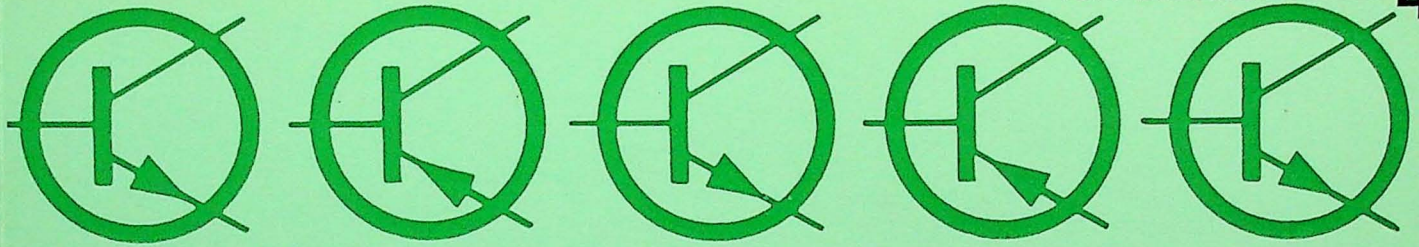
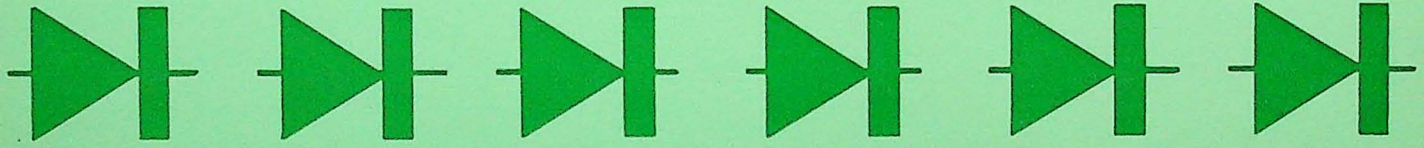
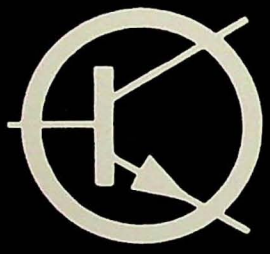
TOPP-Buchreihe Elektronik 41

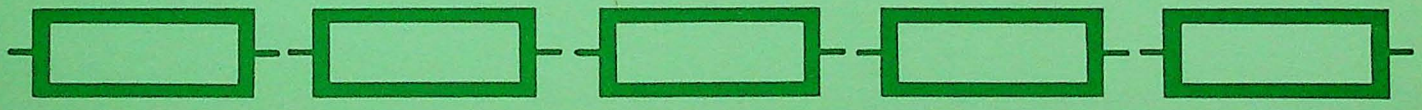






Bergtold

Elektronik-Bauelemente 2



TOPP

-Reihe »Elektronik« 41

Fritz Bergtold

Elektronik- Bauelemente

2

Verlag Frech Stuttgart-Botnang

Inhalt des 1. Bandes

Gleichstromquelle — ihr Sinn und Zweck 9
Gleichstromquellen in Schaltungen 13
Widerstand, Widerstandswert und Leitwert 17
Einstellwiderstände und einstellbare Spannungsteiler ... 23
Heiß- und Kaltleiter 27
Photoleiter 31
Kondensator an Batterie 35
Widerstand und Kondensator als RC-Glied 39
Induktivität beim Schließen eines Gleichstromkreises ... 44
Induktivität und Freilaufdiode 48
Ventil-Diode im Einweggleichrichter 52
Transistoren zum Schalten von Relais 56
Z-Dioden für das Stabilisieren von Gleichspannungen .. 60
Transistoren in Verstärkerstufe 64
Transistoren in Gleichspannungskonstanthaltern 69
Glimmröhren in Kippschaltung 72
Sachverzeichnis 77

© 1969 Verlag und Druckerei M. Frech Stuttgart-Botnang Druck: Frech, Stuttgart-Botnang

Vorwort

Die Elektronik-Bauelemente 2 bieten dem Leser eine bequeme Möglichkeit zum Fortsetzen seines Elektronik-Studiums. Sie machen ihn bekannt mit den Eigenschaften vieler Elektronik-Bauelemente und zeigen ihm genau, wie man diese Bauelemente verwendet. Daneben wird der Leser in die auch für die Elektronik wichtige Wechselstromtechnik eingeführt.

Wieder hat jedes Kapitel ein eigenes Thema und ist in sich abgeschlossen. Man braucht daher die einzelnen Kapitel nicht der Reihe nach durchzuarbeiten, sondern kann je nach Bedarf oder Laune das eine oder andere Kapitel vornehmen.

Wer bereits einige Vorkenntnisse hat, kann die Bauelemente 2 vorab studieren. Hat er, was ich hoffen möchte, Gefallen an diesem Studium gefunden oder gar schon Nutzen daraus gezogen, so seien ihm auch die weiteren Bauelemente-Bändchen zum Durcharbeiten empfohlen.

Obschon das erste Bändchen eine Einführung darstellt, sind die meisten seiner Kapitel, wie in dem vorliegenden Band 2, einzelnen Elektronik-Bauelementen und dafür in Betracht kommenden Schaltungen gewidmet. Der Band 1 kann daher mit bestem Erfolg auch im Anschluß an Band 2 durchstudiert werden.

F. Bergtold

Inhalt

Glimm-Relaisröhre in Zeitschalter 7
Photodiode als »Lichtfühler« für Lichtrelais 11
Spannungsabhängiger Widerstand (VDR) als Überspannungsschutz . 14
Ventil-Dioden in Dioden-Verknüpfungsgliedern 18
Komplementär-Transistoren in Blinkschaltung 25
Wechselstrom und Wechselspannungsquellen 28
Photoelement als Lichtfühler 37
Phototransistor in einem Lichtrelais 43
Glimmröhren zum Stabilisieren von Gleichspannungen 46
Silizium-npn-Transistor in Inverter 52
Kondensator an Wechselstromquelle 57
Elektronischer Druckknopf zum Ein- und Ausschalten 64
RC-Glied an Wechselspannung 67
Feldeffekt-Transistor in Verstärkerschaltung 71
Selen-Ventile im Graetz-Gleichrichter 75

Glimm-Relaisröhre in Zeitschalter

Glimm-Relaisröhre

Bild 1 zeigt das Schaltzeichen einer Glimm-Relaisröhre. Der Kolben einer solchen Röhre umschließt das aus kalter (nicht geheizter) Katode, Anode und Starter (Steuerelektrode) bestehende Röhrensystem. Er enthält eine Gasfüllung mit niedrigem Gasdruck. Diese Gasfüllung ermöglicht bei der hier kalten Katode den Stromdurchgang.

Mit »Glimm« ist darauf hingedeutet, daß bei Stromdurchgang im Röhrenkolben ein Glimmlicht auftritt.

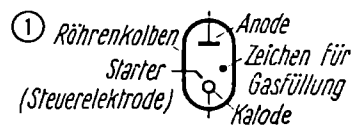
Eine passende Starter-Katoden-Spannung leitet den Stromdurchgang zwischen der Katode und der Anode der Röhre ein, falls die Anode gegen die Katode eine hierfür genügende positive Spannung hat.

Das Einleiten des Starter-Katoden-Glimmstromes wird als **Zünden** der Starter-Katoden-Strecke bezeichnet. Die Starter-Katoden-Spannung, die das Zünden bewirkt, heißt demgemäß **»Starter-Zündspannung«.**

Wenn der mit dem Zünden der Starter-Katoden-Strecke erreichte Zustand von der **Hauptstrecke** (der Katoden-Anoden-Strecke) der Röhre übernommen ist, setzt als Folge dieser **Zündübernahme** der Glimmstrom zwischen Katode und Anode ein. Dieser Strom durchfließt natürlich auch den mit der Hauptstrecke der Röhre in Reihe geschalteten Widerstand (z. B. den Widerstand einer Relaiswicklung). Die Spannung an der Hauptstrecke der Röhre (ihre Anoden-Katoden-Spannung) kippt hierbei von dem Speisespannungswert auf den Brennwert der Hauptstreckenspannung ab. Der **Brennwert** der Hauptstreckenspannung (die **Brennspannung** der Hauptstrecke) ist ein der Röhre charakteristischer Wert. Demgemäß gilt für den Wert des Stromes

$$\text{Strom} = \frac{\text{Speisespannung} - \text{Brennspannung}}{\text{Außenwiderstand}}$$

Mittels des Starters kann man zwar den Stromübergang zwischen Katode und Anode einleiten, ihn aber nicht sperren. Soll die Glimm-Relaisröhre aus dem



Schaltzeichen einer Glimm-Relaisröhre. Es handelt sich hier um einen Röhrentyp ohne Hilfselektrode. Eine Abschirmung des Röhrensystems fehlt. Sofern die Abschirmung nicht angeschlossen zu werden braucht, verzichtet man meistens darauf, sie in das Schaltzeichen einzutragen.

Durchlaßzustand in ihren Sperrzustand zurückgekippt werden, so muß man die Anoden-Katoden-Spannung unter ihren Brennwert absenken. Man bezeichnet das damit erreichte Kippen als **Löschen** der Röhre.
Beim Speisen der Glimm-Relaisröhrenschaltung mit Wechselspannung oder mit einer pulsierenden Spannung, die zwischen zwei Spannungs-Impulsen (oder zwei Spannungs-Halbwellen) jeweils auf Null absinkt, ergibt sich der Sperrzustand der Röhre ohne weiteres Zutun zwischendurch immer wieder. Beim Speisen mit Gleichspannung muß man zum Löschen besondere Schaltungen verwenden.
Glimm-Relaisröhren werden auch **Kaltkatoden-Relaisröhren** bzw. (nicht einwandfrei) **Glimm-** oder **Kaltkatoden-Schaltröhren** genannt. Manchmal bezeichnet man sie kurz und schlecht lediglich als **Kaltkatodenröhren.**

Zeitschalter

Unter Zeitschaltern versteht man Anordnungen, die nach Ablauf bestimmter, einstellbarer Zeitspannen elektrische Schaltvorgänge bewirken.
Elektronische Zeitschalter sind Schaltungen, die Halbleiter-Bauelemente oder Glimmröhren enthalten. In diesen Zeitschaltern erreicht man das Einhalten der Zeitspannen im allgemeinen mit RC-Gliedern. Ein **RC-Glied** ist die Kombination eines Widerstandes mit einem Kondensator.

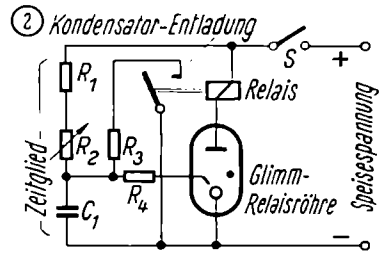
Die meisten Zeitschalter sind so eingerichtet, daß man sie betätigen muß, was mit einem Schalter oder mit Steuerimpulsen möglich ist.
Andere Zeitschalter arbeiten periodisch bzw. nach einem vorgegebenen Programm automatisch.

Eine Zeitschalter-Schaltung

Hier handelt es sich um einen Zeitschalter, den man mit Schließen eines Schalters gewissermaßen in Gang setzt. Der Zeitschalter veranlaßt, nachdem seit dem Schließen des Schalters eine einstellbare Zeitspanne verstrichen ist, einen Schaltvorgang.
Bild 2 veranschaulicht den Schaltplan eines Glimm-Relaisröhren-Zeitschalters. Mit ihm soll das Anziehen des Relaisankers gegen den Zeitpunkt für das Schließen des Schalters S um eine einstellbare Zeitspanne verzögert werden. Das Abfallen des Relaisankers wird mit dem Öffnen des Schalters S bewirkt.

Funktion der Schaltung

Unmittelbar nach dem Schließen des Schalters S tritt die Speisespannung zwischen der Anode und der Katode der Röhre auf. Die Starter-Katoden-Spannung steigt jedoch nur allmählich an. Sie stimmt mit der Spannung am Kondensator C_1 überein.
Der Kondensator C_1 wird über die Reihenschaltung der



Schaltplan eines mit einer Glimm-Relaisröhre bestückten Zeitrelais. Die Speisespannung gewinnt man aus dem Wechselstromnetz über einen Graetz-gleichrichter unter Zuhilfenahme eines Ladekondensators (2 µF/350 V). Bemessung der Einzeltelle z. B. R_1 = 1 MΩ, R_2 = 10 MΩ, linear, $R_3 = R_4$ = 1 kΩ, C_1 je nach maximaler Verzögerungszeit, Relaiswiderstand für Cerberus-Rohre GR 44 18 kΩ, für Elesta-Röhre ER 32A 14 kΩ.

Widerstände R_1 und R_2 aufgeladen. Die Zeit, die verstreicht, bis hiermit die Starter-Zündspannung erreicht ist, hängt — außer von dem bis auf mögliche, relativ geringe Schwankungen festliegenden Wert der Speisespannung — von der Kapazität des Kondensators C_1 und dem am Widerstand R_2 eingestellten Wert von $(R_1 + R_2)$ ab:

Maßgebend für den Spannungsanstieg am Kondensator C_1 ist neben dem Wert der Speisespannung die mit

$$C_1 \cdot (R_1 + R_2)$$

gegebene **Zeitkonstante,** wobei R_2 natürlich den eingestellten Wert bedeutet.

Beispiel: $C_1 = 2\ \mu F$, $(R_1 + R_2) = 5\ M\Omega$. Es sind:

$$C_1 = 2\ \mu F = \quad 2 \cdot 10^{-6}\ F = \quad 2 \cdot 10^{-6}\ A \cdot s : V$$

$$(R_1 + R_2) = \quad 5\ M\Omega = 5 \cdot 10^{6}\ \Omega = 5 \cdot 10^{6}\ V : A \text{ also}$$

$$C_1 \cdot (R_1 + R_2) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot s \cdot 5 \cdot 10^{6} = 10\ s$$

Eine Zeitkonstante von 10 s bedeutet, daß zehn Sekunden nach dem Anlegen der Speisespannung die Kondensatorspannung auf etwa das 0,63-fache der Speisespannung angestiegen ist.

Mit einer Zeitkonstante von 10 s dauert es hier ganz ungefähr 7 s bis das Relais nach Schließen des Schalters seinen Anker anzieht.

Der Widerstand R_3 begrenzt den Kondensator-Entladestrom, der mit Schließen des Relaiskontaktes einsetzt.

Der Widerstand R_4 verhindert einen zu hohen Starter-Anfangsstrom.

Der Widerstand R_1 schützt vor einem zu hohen Starter-Dauerstrom. Mit ihm wird der Einstellbereich von $(R_1 + R_2)$ nach unten begrenzt.

Das Entladen des Kondensators C_1 im Anschluß an das Anziehen des Relaisankers macht die Schaltung bereit, um nach Öffnen und darauf sofort folgendem Schließen des Schalters S das Anziehen des Relaisankers der

Einstellung an R_2 gemäß zu verzögern. Das bedeutet: minimale **Wiederbereitschaftszeit.** Statt Wiederbereitschaftszeit sagt man auch **Erholzeit** oder **Erholungszeit.**

Beispiel für das Verwenden der Schaltung

Es handle sich um das Einhalten einer bestimmten, am Widerstand R_2 einstellbaren Belichtungszeit. Dafür hat das Relais außer dem hier eingetragenen Arbeitskontakt einen Ruhekontakt. Der Schalter S ist hierbei zweipolig ausgeführt. Mit dem zweiten Kontakt dieses Schalters wird die zum Belichten dienende Lampe eingeschaltet. Deren Strom ist über einen zweiten Relais-Ruhekontakt geleitet. Die Belichtungszeit beginnt mit dem Schließen des Schalters und endet mit dem Ansprechen des Relais.

Wichtigstes über Glimm-Relaisröhren

- Die Glimm-Relaisröhre ist eine Röhre mit ungeheizter Katode, in der bei dafür ausreichender positiver Anoden-Katoden-Spannung mit Hilfe eines Starters ein dann zwischen Katode und Anode fließender Glimmstrom eingeleitet werden kann.
- Dieser Glimmstrom setzt abrupt ein, wenn die Starter-Katoden-Spannung ihren Zündwert (die Starter-Zündspannung) erreicht hat und als Folge hiervon ein genügender Starter-Katoden-Glimmstrom fließt.
- Der Katoden-Anoden-Glimmstrom kann nicht mittels des Starters sondern nur mit dafür genügendem Herabsetzen der Anoden-Katoden-Spannung unterbrochen (gelöscht) werden.
- Mit dem Einsetzen des Katoden-Anoden-Glimmstromes springt die Anoden-Katodenspannung vom augenblicklichen Speisespannungswert auf den (meistens etwa 110 V betragenden) Brennwert zurück.
- Voraussetzung ist hierbei der in Reihe mit der Anoden-Katoden-Strecke liegende Widerstand (im Bild 2 der Relais-Wicklungswiderstand). Dieser Widerstand muß den die Röhre durchfließenden Glimmstrom auf ein zulässiges Maß begrenzen.
- Der (Starter-)Eingangswiderstand ist bei Glimm-Relaisröhren sehr hoch (ein wesentlicher Vorteil).
- Die Glimm-Relaisröhren können je nach Typ an Gleichspannung bzw. an pulsierender Spannung oder an Wechselspannung betrieben werden.
- Bei der Speise-Wechselspannung handelt es sich fast immer unmittelbar um die Spannung des 220V-Netzes.
- Als Speise-Gleichspannung werden etwa 300 V benötigt. Diese Gleichspannung kann man aus dem 220V-Wechselstromnetz ohne Netztransformator mit Einweg-Gleichrichtung gewinnen.
- Bei Stromdurchgang tritt in der Röhre ein Glimmlicht auf. Das Auftreten des Glimmlichtes ist für das Beobachten der Funktion der Schaltung ein Vorteil.

Photodiode als »Lichtfühler« für Lichtrelais

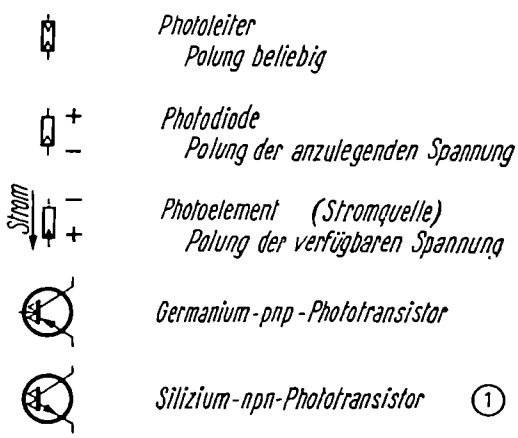
Was üblicherweise »Lichtfühler« heißt

Lichtfühler ist in beiden Überschriften in Anführungszeichen gesetzt. Das hat seinen Grund: Hierunter versteht man im Zusammenhang mit der Regel- und Steuertechnik diejenigen Bauelemente, in denen wesentliche elektrische Eigenschaften für die Dauer des Einwirkens nicht nur von (sichtbarem) Licht, sondern auch von Infrarotstrahlung erheblich beeinflußt werden. Mit so bestrahlten Lichtfühlern kann man das Verhalten daran angeschlossener (damit gesteuerter) elektrischer Schaltungen ändern.

Lichtfühler = photoelektronisches Bauelement

Ein photoelektronisches (kurz photoelektrisches) Bauelement ist damit charakterisiert, daß unter Einwirken von Licht oder Infrarotstrahlung sein Leitwert zunimmt oder an ihm eine Spannung verfügbar wird.
Bild 1 gibt einen Überblick über die hier interessierenden photoelektronischen Halbleiter-Bauelemente, zu denen die Photodioden gehören.

Jede Photodiode ist eine Halbleiter-Diode, die für die eine Stromrichtung einen hohen Leitwert und für die andere Stromrichtung (die Sperrichtung) einen hohen Widerstand hat. Dieser Sperrwiderstand einer Photodiode nimmt bei Einwirken von Licht- bzw. von Infrarotstrahlung stark ab.
Da man bei der Photodiode den Sperrwiderstand (bzw. dessen Kehrwert, d. h. den **Sperrleitwert**) als licht- bzw.

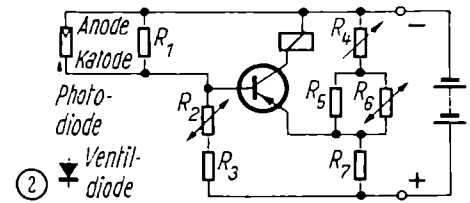


Übersicht über die photoelektronischen Bauelemente mit den dafür gebräuchlichen Schaltzeichen und den Benennungen. Man beachte, daß die Silizium-Phototransistoren häufig keinen Basisanschluß haben.

strahlungsabhängigen Wert ausnutzt, muß die Photodiode in einem mit einer Gleichstromquelle ausgestatteten Stromkreis verwendet werden.

Photodioden nutzt man demgemäß ebenso aus wie Photoleiter. Den Photoleitern gegenüber haben sie den Vorteil einer geringeren Trägheit des Verhaltens: In den Photodioden wirken sich Änderungen der Einstrahlung auf den elektrischen Leitwert rascher aus als in Photoleitern.

In Photodioden dürfen üblicherweise nur geringe elektrische Leistungen in Wärmeleistung umgesetzt werden. Mit Photodioden kann man daher — im Gegensatz zu manchen Photoleiter-Typen — elektromagnetische Relais nicht unmittelbar steuern.



Schaltplan eines mit einem pnp-Transistor bestückten Lichtrelais. Beispielsweise seien folgende Werte genannt: R_1 = 100 kΩ, R_2 = Heißleiter mit Kaltwiderstand 4,7 kΩ, R_3 = 2,7 Ω, R_4 = 1 kΩ, linear, R_5 = 1 kΩ, R_6 = Heißleiter mit Kaltwiderstand 500 Ω, R_7 = 120 Ω, Speise-Gleichspannung = 6 V, Relaiswiderstand ≈ 2 kΩ, Transistor für wenigstens 20 V und 5 mA sowie 100 mW höchstzulässige Verlustleistung.

Schaltung mit Photodiode als Lichtfühler

In dem **Bild 2** ist ganz links das Schaltzeichen einer Photodiode eingetragen. Diese bildet hier, wie man in Bild 2 sofort erkennen kann, gemeinsam mit dem ihr parallel geschalteten Widerstand R_1 einen Abschnitt des Transistor-Basis-Spannungsteilers. Die Photodiode ist dabei ihrer Sperrichtung gemäß gepolt (Anode am Minuspol, Katode über Widerstände am Pluspol der Speisespannung). Im Photodioden-Schaltzeichen wird die Anode mit dem kleinen Dreieck kenntlich gemacht, das dem Dreieck des Ventildioden-Schaltzeichens (im Bild 2 links unten) entspricht. Bei Einwirken von Licht auf die Photodiode nimmt deren Sperrleitwert zu. Folglich steigt in der Schaltung nach Bild 2 der Betrag der negativen Basis-Emitter-Spannung des pnp-Transistors an.

Der Basis-Spannungsteiler ist — in Verbindung mit dem Emitter-Spannungsteiler — so bemessen, daß der Transistor bei fehlender und schwacher Lichteinwirkung gesperrt bleibt. Die Beleuchtungsstärke bzw. die Strahlungsdichte, bei der der Durchlaßzustand des Transistors einsetzt, kann an dem Widerstand R_1 eingestellt werden. Mit dem Widerstand R_1 wird gewissermaßen für den Lichtfühler (die Photodiode) ein Mindestleitwert festgelegt.

Die Widerstände R_2 und R_4 sind Heißleiter. Sie wirken den Einflüssen der Temperatur auf den Zusammenhang zwischen Licht- bzw. Strahlungs-Einwirken und Collectorstrom des Transistors entgegen.
Mit den Widerständen R_3 und R_5 wird der temperaturabhängige Widerstands-Verlauf diesem Zweck angepaßt.
Im Collector-Emitter-Stromweg des Transistors liegt die Wicklung des elektromagnetischen Relais, mit dessen hier nicht eingetragenem Kontaktfedersatz die nachfolgende Schaltung gesteuert wird.
Die in Bild 2 gezeigte Schaltung eignet sich nur für solche Fälle, in denen das Einwirken der Licht- bzw. Infrarotstrahlung zwischen zwei Werten sprunghaft wechselt (also z. B. für Lichtschranken). Die eine Einwirkung muß mindestens so stark sein, daß sie das Anziehen des Relaisankers bewirken kann. Die andere Einwirkung darf höchstens so groß sein, daß sie das Abfallen des Relaisankers nicht verhindert.

Andere Bestückung

Natürlich sind Transistoren für höhere höchstzulässige Werte von Spannung, Strom und Verlustleistung verwendbar. Das ermöglicht einen höheren Wert der Speisespannung und geringere Werte von R_7 und Relaiswiderstand. Zu empfehlen ist dann eine Freilaufdiode parallel zum Relais (mit Anode an den Minuspol).

Wenn statt des pnp-Transistors ein npn-Transistor verwendet werden soll, muß man die Speisespannung, die Photodiode und gegebenenfalls die Freilaufdiode umpolen.

Wichtigstes über Photodioden

- Unter einer Photodiode versteht man eine Halbleiter-Diode mit einem Sperrleitwert, der von einer Lichtstrahlung oder von einer Infrarotstrahlung beeinflußbar ist, die auf die dafür empfindliche Fläche des Photodioden-Systems trifft.
- Die Photodiode wird an einer für sie in Sperrichtung gepolten Gleichspannung in Reihe mit einem Widerstand oder einem anderen Stromzweig betrieben.
- Sperrichtung bedeutet: Die Photodioden-Anode ist dem negativen Pol der Speisespannung zugeordnet. Ihre Katode steht dabei mit dem positiven Pol der Speisespannung in Verbindung.
- Photodioden haben vor Photo-Leitern den Vorteil einer geringeren Verzögerung der Leitwerts-Änderungen gegen die diese veranlassenden sprunghaften Änderungen der Lichteinwirkung (exakter: der Strahlungs-Einwirkung).
- Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit der Photodioden liegt im Infrarot-Bereich, da für Photodioden als Halbleitermaterial im allgemeinen nur Germanium verwendet wird.

Spannungsabhängiger Widerstand (VDR) als Überspannungsschutz

Auftreten von Überspannungen

Überspannungen treten vorwiegend beim Unterbrechen von Strömen auf, falls diese mit Induktivitäten behaftete Stromzweige durchfließen. Das Vorhandensein einer Induktivität bedeutet, daß dem Strom ein **Magnetfeld** zugeordnet ist.
Ein jedes Magnetfeld hat einen **Arbeitsinhalt.** Dieser wird beim Unterbrechen des das Magnetfeld bewirkenden Stromes schlagartig abgebaut. Dabei entsteht in dem mit der Induktivität behafteten Stromzweig eine Spannung. Deren Polung entspricht der Richtung des unterbrochenen Stromes. (Diese Spannung sucht den Strom gewissermaßen aufrecht zu erhalten.)

Abschalten mit mechanisch betätigtem Schalter

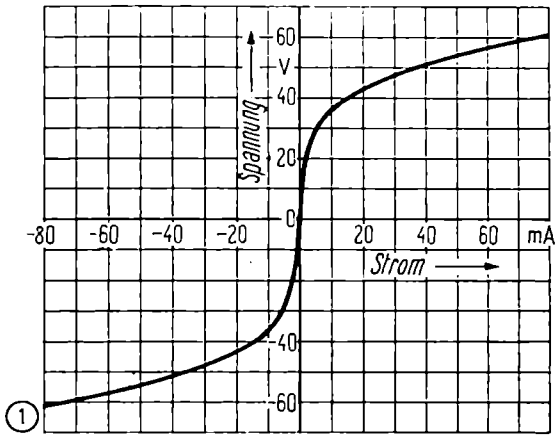
Erfolgt das Abschalten einer Wicklung mit einem mechanischen Schalter, der den Strom plötzlich unterbricht, so baut sich aus dem Arbeitsinhalt des Magnetfeldes ein elektrisches Feld auf, zu dem fast immer eine sehr hohe Spannung gehört.

Abschalten elektronisch

Falls der Strom mit dem Steuern eines elektronischen Bauelementes aus dessen Durchschaltzustand in dessen Sperrzustand abgeschaltet wird, handelt es sich um eine stetige, wenn auch meistens sehr rasche Abnahme des Stromes. In diesem Fall ist die an der Wicklung auftretende Überspannung mit dem Produkt aus der Induktivität der Strombahn und der **Änderungsgeschwindigkeit** des Stromes gegeben.
Die **Einheit der Induktivität** ist das **Henry,** wobei $1\ H = 1\ V \cdot s : A$. Die Änderungsgeschwindigkeit des Stromes kann in A : s angegeben werden. Das Produkt aus Induktivität und Strom-Änderungsgeschwindigkeit ist somit in der Tat eine Spannung.

Was bedeutet VDR?

Ein VDR (Abkürzung von **v**oltage **d**ependent **r**esistor), den man auch **Varistor** nennt, hat einen mit steigender Spannung sinkenden Widerstandswert. Zu einem verhältnismäßig geringen Spannungsanstieg gehört deshalb eine unverhältnismäßig große Zunahme des Stromes. Das gilt für beide Polungen in derselben Weise (**Bild 1**). Voltage dependent resistor heißt: Widerstand mit spannungsabhängigem Wert.
Die VDR-Eigenschaften werden gekennzeichnet mit einer **Bauartkonstante** C und einer **Materialkonstante** β.



Spannungs-Strom-Kennlinie eines VDR. Nur im Bereich geringer Stromwerte steigt die Spannung mit zunehmendem Strom stark an. Bei weiterem Erhöhen des Stromes wird der Spannungsanstieg immer geringer. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Strom ist demgemäß im Gegensatz zu dem, was für einen ohmschen Widerstand gilt, stark nichtlinear. Das Verhalten des VDR hängt, wie man sieht, von der Stromrichtung und damit natürlich auch von der Polung der angelegten Spannung nicht ab.

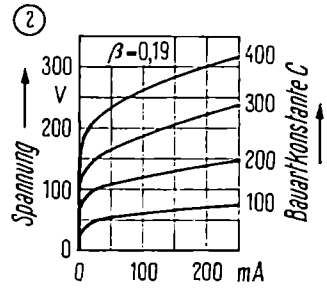
Befassen wir uns erst mit β. Anschaulicher als mit β selbst wird die Sache mit dem Kehrwert von β. Der Wert von β liegt in der Regel zwischen 0,2 und 0,25. Es gehören zu 0,2 der Kehrwert 1 : 0,2 = 5 ebenso wie zu 0,25 der Kehrwert 1 : 0,25 = 4.

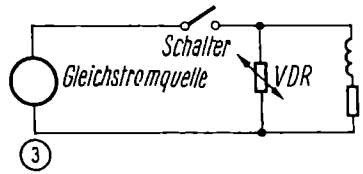
Ist der Kehrwert von β z. B. gleich 4 so heißt das: Zu einem Erhohen der Spannung auf das 1,5fache gehört ein (1,5 · 1,5 · 1,5 · 1,5)facher Strom, d. h. ein rund fünffacher Strom.

Hieraus folgt: Je kleiner der Wert von β ist, desto weniger steigt die Spannung bei Erhöhen des Stromes an. Im allgemeinen erweist sich deshalb ein geringer Wert von β als günstig.

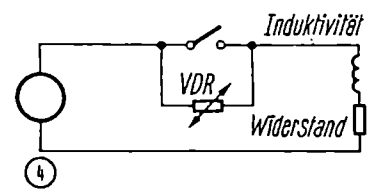
Einen je größeren Wert die Bauartkonstante C hat, desto höher ist die zu einem gegebenen Wert des Stromes gehörende Spannung (**Bild 2**).

Dieses Bild entspricht dem rechten oberen Viertel des Bildes 1. Es zeigt, daß der von dem VDR zu erfassende Spannungsbereich mit der Bauartkonstante gekennzeichnet wird.





VDR zum Vermeiden eines Öffnungsfunkens am Schalter der Last parallel geschaltet. Als Last ist hier die Reihenschaltung einer Induktivität mit einem (ohmschen) Widerstand angenommen.



In dieser Schaltung liegt der VDR dem Schalter parallel. Der VDR überbrückt hierbei den offenen Schalter.

Beim Öffnen des Schalters verbleibt deshalb ein Reststrom.

Wie Bild 2 zu erkennen gibt, richtet sich der im Einzelfall zu wählende VDR-Typ im Hinblick auf dessen C-Wert nach dem in Betracht kommenden Wertepaar von Spannung und Strom.
Bei der Wahl des VDR-Typs hat man schließlich die im VDR in Wärme umgesetzte Leistung bzw. deren zeitlichen Mittelwert zu beachten. Die VDR-Typen sind nach solchen höchstzulässigen Leistungswerten gestaffelt.

Überspannungsschutz mit VDR

Ein VDR hat einen Leitwert, der mit steigender Spannung beträchtlich zunimmt. Legt man einen VDR als Verbindung zwischen zwei Punkte, zwischen denen eine höhere Überspannung vermieden werden muß, so wirkt der mit zunehmender Spannung größer werdende Leitwert des VDR dem Spannungsanstieg entgegen. Natürlich muß man einen solchen VDR auswählen, dessen bei fehlender Überspannung geltender Leitwert den Betrieb noch nicht erheblich stören kann.

VDR in der Schaltung

Zum Schutz gegen Überspannung legt man den Varistor entweder parallel zu dem mit Induktivität behafteten Stromzweig (**Bild 3**) oder parallel zum Schalter (**Bild 4**). Mit dem Varistor wird die am Schalter bei dessen Öffnen auftretende Spannung auf einen dafür noch

zulässigen Wert begrenzt. Will man an einem mechanischen Kontakt **Öffnungsfunken** (Funken beim Unterbrechen des Stromes) vermeiden, so bedeutet das an der Unterbrechungsstelle eine Spannung mit einem Wert von höchstens etwa 300 V.

Die zwei Möglichkeiten

Im Falle des Bildes 3 tritt am Schalter bei Unterbrechen des Stromes die Summe aus der Speisespannung und der Spannung am Varistor auf.
In der Schaltung nach Bild 4 stimmt die Spannung am Schalter mit der Spannung am Varistor überein. Man wählt den Varistor so aus, daß der ihn bei angelegter Speisespannung durchfließende Strom ganz ungefähr einem Zehntel des Stromes in dem mit Induktivität behafteten Zweig gleichkommt. In der Schaltung nach Bild 4 wird der kritische Wert der Spannung an der Unterbrechungsstelle (300 V) erst bei einem höheren Wert der Speisespannung erreicht (etwa bei 170 V) als in der Schaltung nach Bild 3 (Speisespannung maximal 110 V).

Das Wichtigste über VDR

- Als VDR oder als Varistor bezeichnet man ein Bauelement mit zwei Anschlüssen und der charakteristischen Eigenheit, daß der Strom bei steigendem Wert der angelegten Spannung unverhältnismäßig stark zunimmt.
- Dieser Zusammenhang zwischen Spannung und Strom gilt für beide Stromrichtungen gleichermaßen.
- Varistoren werden vor allem zum Begrenzen von Spannungen verwendet.
- Der für Varistoren geltende Zusammenhang zwischen Spannung und Strom wird mit der Bauartkonstante C und der Materialkonstante β gekennzeichnet.
- Die Werte von C liegen ungefähr zwischen 10 und 1000, während für β Werte um 0,2 in Betracht kommen.
- Der Zusammenhang zwischen Spannung und Strom wird in den Datenlisten in Form von Kennlinien veranschaulicht.
- Diesen Kennlinien liegen meistens logarithmische Maßstäbe für Spannung und Strom zugrunde.
- Bei logarithmischen Maßstäben verlaufen die VDR-Spannungs-Strom-Kennlinien über weite Strombereiche nahezu gerade.
- VDR verwendet man vorwiegend zum Begrenzen von Überspannungen — insbesondere von solchen Überspannungen, die beim Abschalten von induktivitätsbehafteten Stromzweigen auftreten.

Ventil-Dioden in Dioden-Verknüpfungsgliedern

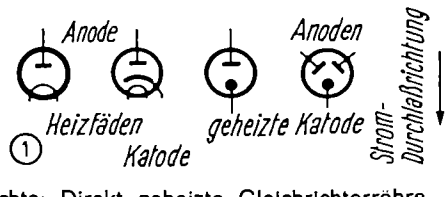
Ventil-Diode

Eine Ventil-Diode ist ein Bauelement mit zwei Anschlüssen (ein **Zweipol**), dessen besonderes Kennzeichen in einem hohen Leitwert für eine der beiden möglichen Stromrichtungen und in einem hohen Widerstand besteht, der sich dem in der anderen Richtung durchgeschickten Strom entgegensetzt.
Man drückt das so aus, daß man sagt: Durchlaßleitwert und Sperrwiderstand einer Ventildiode sind hoch.
Um die Verschiedenheit des Verhaltens der Ventildiode für die beiden Stromrichtungen zu kennzeichnen, bezeichnet man ihren einen Anschluß als Anodenanschluß oder kurz als Anode und den anderen Anschluß als Katodenanschluß oder kurz als Katode.
Zu der **Durchlaßrichtung** gehört eine positive Spannung der Anode gegen die Katode. Man kann sich das notfalls mit dem Wort **knapp** merken: **K**atode **n**egativ, **A**node **p**ositiv.
Für die **Sperrichtung** gelten eine negative Spannung der Anode gegen die Katode und demgemäß eine positive Katoden-Anoden-Spannung.

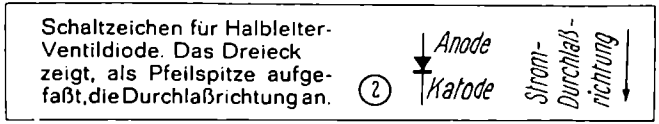
Statt vom hohen Durchlaßleitwert und vom hohen Sperrwiderstand spricht man meistens von der niedrigen **Durchlaßspannung** und von dem niedrigen **Sperrstromwert.**
Es ist nämlich die Durchlaßspannung vom Wert des Durchlaßstromes nur wenig abhängig und der Sperrstrom innerhalb eines größeren Sperrspannungsbereiches häufig einigermaßen konstant.

Früher: Röhren als Ventil-Dioden

Eine Röhren-Ventildiode enthielt in einem luftleer gepumpten oder unter geringem Druck gasgefüllten Kolben eine Anode oder auch zwei Anoden und eine geheizte Katode (**Bild 1**). Solche **Hochvakuum-Gleichrichterröhren** bzw. **gasgefüllte Gleichrichterröhren** verwen-



Für Hochvakuum-Gleichrichterröhren übliche Schaltzeichen. Von links nach rechts: Direkt geheizte Gleichrichterröhre, Indirekt geheizte Gleichrichterröhre (Katode von Heizfaden getrennt), Gleichrichterröhre ohne Hinweis darauf ob direkt oder indirekt geheizt, Gleichrichterröhre für Zweiweg-Gleichrichtung.



Schaltzeichen für Halbleiter-Ventildiode. Das Dreieck zeigt, als Pfeilspitze aufgefaßt, die Durchlaßrichtung an.

det man seit vielen Jahren nurmehr ausnahmsweise. Sie haben als Nachteile: Notwendigkeit der Katodenheizung, relativ hohe Werte der Durchlaßspannung und große Abmessungen.

Heute versteht man unter Ventil-Dioden durchweg nurmehr Halbleiter-Bauelemente mit Ventilwirkung zwischen ihren beiden Anschlüssen (**Bild 2**). **Manchmal** bezeichnet man diese Ventil-Dioden kurz nur als Dioden. Das aber ist nicht gut, weil es außer Ventil-Dioden auch noch andere Dioden gibt. Mit der Bezeichnung »**Diode**« ist (genau genommen) ein jedes Bauelement gemeint, das zwei Anschlüsse hat und sich gegenüber beiden möglichen Stromrichtungen verschieden verhält.

Arten der Halbleiter-Ventildioden

Halbleiter-Ventildioden werden heute fast durchweg entweder aus Silizium oder aus Germanium gefertigt.

Silizium-Dioden sperren besser (geringere Sperrstromwerte), vertragen höhere Temperaturen und halten meistens auch höhere Sperrspannungen aus.

Germanium-Dioden benötigen für sich im Durchlaßzustand etwas geringere Spannungen.

Verknüpfungsglied (Verknüpfungselement)

Ein Verknüpfungsglied ist eine Schaltung mit wenigstens zwei Eingängen und einem Ausgang, manchmal auch mit zwei Ausgängen. Spricht man schlechtweg von einem Verknüpfungsglied, so meint man damit — wie hier — ein Glied für **binäre Verknüpfungen.**

Mit »**binär**« ist angedeutet, daß dabei nur zwei **Signalspannungs-Pegel** in Frage kommen: ein höherer Pegel U_H oder kurz H und ein niedrigerer Pegel U_L oder kurz L. An jedem Eingang und jedem Ausgang eines Binär-Verknüpfungsgliedes (genauer eines Gliedes für binäre Verknüpfungen) sind somit im Betriebsfall nur entweder U_H oder U_L möglich. Statt »Binär-Verknüpfung« sagt man auch **Logik-Verknüpfung** und demgemäß statt (Binär-) **Verknüpfungsglied** auch »**Logikglied**«.

Die mit Dioden ohne Transistoren realisierbaren Verknüpfungen

Das sind die UND-Verknüpfung sowie die ODER-Verknüpfung. Diese beiden Verknüpfungen — wie auch alle übrigen binären Verknüpfungen — bezieht man an sich (d. h. losgelöst von den Schaltungen, in denen sie realisiert werden) nicht auf Spannungspegel sondern auf die Zahlen 0 und 1, die in diesem Zusammenhang **Logikzahlen** (Logik-Null und Logik-Eins) genannt werden. Hiermit ist es möglich, die UND- und ODER-Verknüpfung so zu beschreiben:

Hat man es mit einer Kombination zweier oder auch mehrerer **(Eingangs-) Logikzahlen** zu tun, so erhält man als

Ergebnis der **UND-Verknüpfung** die **(Ausgangs-) Logikzahl** 1 nur, wenn alle Eingangs-Logikzahlen 1 sind, und als

Ergebnis der **ODER-Verknüpfung** die Ausgangs-Logikzahl 1, wenn wenigstens eine 1 in der Kombination der Eingangs-Logikzahlen vorkommt.

Mit den allgemeinen Eingangs-Logikzahlen *a*, *b*, *c* und der Ausgangs-Logikzahl *q* läßt sich dies so formulieren:

bei UND-Verknüpfung von *a*, *b* und *c* ist $q = 1$ nur, wenn $a =$ **und** $b = 1$ **und** $c = 1$. Sonst ist hierbei $q = 0$.

bei ODER-Verknüpfung von *a*, *b* und *c* ist $q = 1$ stets, wenn wenigstens $a = 1$ **oder** $b = 1$ **oder** $c = 1$, also $q = 0$ nur, wenn $a = 0$ und $b = 0$ und $c = 0$

Als **allgemein** bezeichnet man eine **Logikzahl** dann, wenn offensteht, ob diese Zahl gleich 1 oder gleich 0 gesetzt wird bzw. werden kann. Als allgemeine Logikzahlen dienen kleine Buchstaben (siehe oben).

Die **Bilder 3** und **4** veranschaulichen das Ergebnis *q* der UND-Verknüpfung sowie der ODER-Verknüpfung für alle möglichen Kombinationen der Werte 0 und 1 für die Eingangs-Logikzahlen *a*, *b* und *c* in Tabellenform.

Derartige Tabellen nennt man auch **Logiktafeln** oder **Verknüpfungstafeln** oder **Wahrheitstabellen** bzw. **Wahrheitstafeln.** Im Zusammenhang mit der Bezeichnung

UND-Logiktafel = UND-Verknüpfungstafel

a	*b*	*c*	*q*
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0

③

a	*b*	*c*	*q*
1	1	1	1
alle anderen Kombinationen			0

Zwei die UND-Verknüpfung dreier Eingangs-Logikzahlen betreffende Tafeln. Oben sind alle möglichen Kombinationen der Eingangs-Logikzahlen einzeln berücksichtigt. Unten sind die Kombinationen zusammengefaßt, denen die Ausgangs-Logikzahl Null zugeordnet ist.

ODER-Logiktafel = ODER-Verknüpfungstafel

a	*b*	*c*	*q*
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1

④

a	*b*	*c*	*q*
0	0	0	0
alle anderen Kombinationen			1

Diese zwei Tafeln betreffen die ODER-Verknüpfung dreier Logikzahlen ebenso wie die Tafeln des Bildes 3 deren UND-Verknüpfung. Hier ergibt sich die Ausgangs-Logikzahl Null nur für eine Eingangs-Logikzahlkombination (alle drei Eingangs-Logikzahlen gleich Null).

Wahrheitstafel steht 1 für »zutreffend« oder **»wahr«** und 0 für »unzutreffend« oder **»unwahr«.**
In einer Schaltung, in der solche Verknüpfungen realisiert werden sollen, hat man es natürlich nicht mit den Zahlen 0 und 1 sondern statt dessen mit den bereits erwähnten **Spannungspegeln** *L* und *H* zu tun.
Dabei ordnet man meistens den Spannungspegel *H* der Logikzahl 1 zu (***H*-Zuordung**). Man verwendet aber auch die entgegengesetzte Zuordnung, wobei *L* die Logikzahl 1 vertritt (***L*-Zuordnung**). Man sagt leider auch:

statt *H*-Zuordnung **»positive Logik«** und
statt *L*-Zuordnung **»negative Logik«.**

Mit den Zuordnungen (*H* bzw. *L*) folgen aus den in den Bildern 3 und 4 enthaltenen Logiktafeln die in den **Bildern 5** und **6** gezeigten **Pegeltafeln (Arbeitstafeln).**
Während eine Logiktafel die Ausgangs-Logikzahlen als Ergebnisse der Verknüpfungen der Eingangs-Logikzahlen enthält, zeigt eine Pegeltafel die Ausgangs-Spannungspegel als Folge der Spannungspegel an den Eingängen einer Verknüpfungsschaltung.

Verknüpfungssymbole

Das Symbol einer Logik-Verknüpfung ist ein Halbkreis mit dem ihn abschließenden Durchmesser, wobei zwischen die zwei Viertelkreise eine diesem Durchmesser parallele Strecke eingesetzt und der Durchmesser demgemäß verlängert sein kann.

H-UND/L-ODER-Pegeltafel

A	*B*	*C*	*Q*
L	*L*	*L*	*L*
L	*L*	*H*	*L*
L	*H*	*L*	*L*
L	*H*	*H*	*L*
H	*H*	*L*	*L*
H	*H*	*H*	*H*
H	*L*	*L*	*L*
⑤ *H*	*L*	*H*	*L*

Vertritt der *H*-Pegel die Logikzahl 1, so handelt es sich um die UND-Verknüpfung. Ordnet man den *L*-Pegel der Logikzahl 1 zu, so hat man es mit der ODER-Verknüpfung zu tun.

H-ODER/L-UND-Pegeltafel

A	*B*	*C*	*Q*
H	*H*	*H*	*H*
H	*H*	*L*	*H*
H	*L*	*H*	*H*
H	*L*	*L*	*H*
L	*L*	*H*	*H*
L	*L*	*L*	*L*
L	*H*	*H*	*H*
⑥ *L*	*H*	*L*	*H*

Läßt man den *H*-Pegel als Logikzahl 1 gelten, so stellt die Tafel die ODER-Verknüpfung dar. Mit dem *L*-Pegel für die Logikzahl 1 betrifft diese Tafel die UND-Verknüpfung.

zu verknüpfende Logikzahlen a,b Verknüpfungs-Ergebnis q

⑦

UND-Logiksymbol *ODER-Logiksymbol*

Die Verknüpfungssymbole für die UND- bzw. ODER-Verknüpfung (Eingänge links, Ausgang rechts). Manchmal werden diese Symbole auch gegen diese Darstellung um 90 ° verdreht eingetragen.

Der (gegebenfalls verlängerte) Durchmesser ist den Eingängen zugeordnet. Der (einzelne) Ausgang wird (senkrecht zum Durchmesser) an dem (gegebenenfalls verlängerten) Halbkreis an der Mitte des Symbols eingetragen. Man unterscheidet dabei die Symbole für UND-Verknüpfung von denen für ODER-Verknüpfung mit den die Eingänge bedeutenden Strichen (**Bild 7**).

Aufgaben der Ventil-Dioden in den Verknüpfungsgliedern

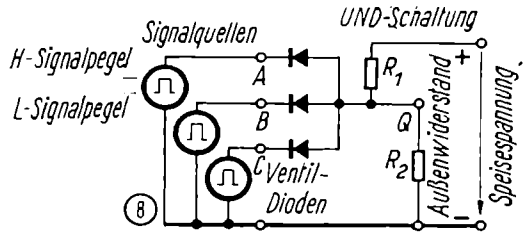
Die Dioden dienen hier als Schalter. Die Diode hat dabei die Aufgabe, eine Strecke bzw. einen Stromweg zu sperren oder freizugeben. Dazu werden ihr Sperrzustand und ihr Durchlaßzustand im Zusammenhang mit ihrer Schleusenspannung ausgenutzt.
Als **Schleusenspannung (Schwellenspannung)** gilt hier die der Durchlaßrichtung gemäß gepolte Diodenspannung bei deren Überschreiten der Diodenstrom in nennenswertem Ausmaß einsetzt. Für Siliziumdioden beträgt die Schleusenspannung bei 25 °C rund 0,7 V. Das heißt: Bei Erhöhen der Durchlaßspannung von 0 V an bleibt die Diode praktisch gesperrt, bis diese 0,7 V überschritten werden.

Die Schaltpläne

Die Schaltpläne (**Bilder 8** und **9**) zeigen zwei Arten von Verknüpfungsgliedern mit jeweils drei Eingängen und einem Ausgang.
Jeder Eingang einer solchen Schaltung steht unter dem Einfluß einer Signalquelle, die einen nur geringen (hier vernachlässigbaren) Ausgangswiderstand hat. Vom Ausgang der Signalquelle wird an den ihr zugeordneten Eingang der Logikschaltung eine Signalspannung gegeben. Als Signalspannungen kommen hier U_L = 0 V und eine Spannung U_H mit einem positiven Wert von wenigstens zwei Volt in Frage.
Die in die Signalquellen-Schaltzeichen eingetragenen Linienzüge sind nicht unbedingt als Impulse aufzufassen. Sie sollen nur andeuten, daß die Eingangsspannung (zeitweise) einen niedrigen Wert (hier 0 V) oder einen höheren Wert (hier mehr als +2 V) aufweist. Diese Spannungen gelten, wie auch die Ausgangsspannung, gegen Masse.

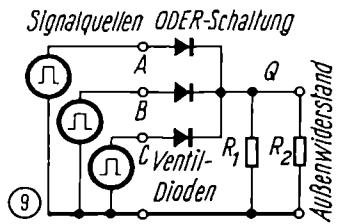
***H*-UND-Schaltung**

In dieser Schaltung (**Bild 8**) wird der Außenwiderstand R_2 dann, wenn alle Eingangs-Signalspannungen den Wert U_L (= 0 V) aufweisen, von den Reihenschaltungen der dafür in Durchlaßzustand befindlichen Dioden mit den dann spannungslosen Signalquellen überbrückt. Hierbei kann an R_2 als Bruchteil der Speisespannung noch der Wert der Schleusenspannung der Dioden (etwa 0,7 V) auftreten. Diese Überbrückung



Man nennt diese Schaltung üblicherweise nur UND-Schaltung, genau genommen müßte sie aber *H*-UND-Schaltung heißen. Für *L*-Zuordnung ist sie nämlich eine ODER-Schaltung.

Wenn auch meistens nur als ODER-Schaltung bezeichnet, ist dies eine *H*-ODER/*L*-UND-Schaltung. Ob ODER oder UND folgt aus der Zuordnung von *H* bzw. *L* zur Logikzahl 1.



wird erst aufgehoben, wenn alle Dioden von den positiven Signalspannungen U_H der ihnen zugeordneten Signalquellen in den Sperrzustand versetzt sind. Das ist der Fall, wenn an den einen **und** den anderen **und** den dritten Eingang (d. h. an alle Eingänge) gleichzeitig die positiven Signalspannungen mit dem Wert U_H gegeben werden.

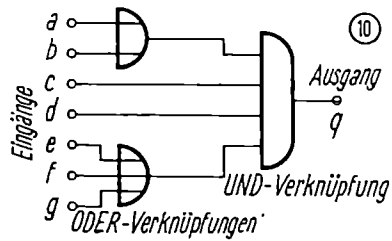
H-ODER-Schaltung

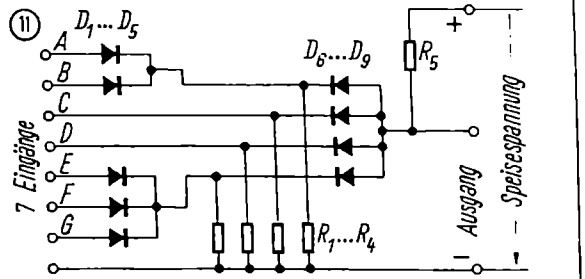
In ihr (**Bild 9**) tritt am Ausgang die (um die Dioden-Schleusenspannung herabgesetzte) Eingangsspannung als Spannung U_H auf, wenn an wenigstens einem Eingang die Spannung U_H (über +2 V) herrscht. Diese Spannung wirkt sich über die dafür im Durchlaßzustand befindliche Diode auf die Parallelschaltung der Widerstände R_1 und R_2 aus. Für die anderen Dioden gilt hinsichtlich dieser Spannung an R_1 und R_2 der Sperrzustand. Folglich können die zu diesen anderen Dioden gehörenden Stromzweige das Auswirken der einen Eingangsspannung auf R_1 und R_2 nicht beeinträchtigen. Hieraus folgt gemäß der ODER-Schaltung (Bild 9):
In der ODER-Schaltung ergibt sich ein Ausgangssignal U_H als positive Spannung gegen Masse, wenn eine solche Signalspannung von mehr als einem Volt an einem Eingang **oder** an zwei Eingängen **oder** an mehreren Eingängen **oder** an allen Eingängen herrscht.
Sind die Spannungen an sämtlichen Eingängen kleiner als etwa 0,7 V, so tritt an der Parallelschaltung von R_2 mit R_1 keine Spannung auf, was dort U_L bedeutet.

Kombinierte Schaltung

Bild 10 veranschaulicht den Logikplan für den Fall, daß $q = 1$, wenn wenigstens *a* **oder** *b* **und** *c* **und** wenigstens *e* **oder** *f* **oder** *g* gleich 1.

Logikplan für die Kombination zweier ODER-Verknüpfungen mit einer zusammenfassenden UND-Verknüpfung.





Verknüpfungsschaltung, mit der die im Logikplan gezeigte Verknüpfung als *H*-Zuordnung verwirklicht ist (vergl. hiermit die Bilder 8 und 9).

Für die *H*-Zuordnung (*H*-Pegel für die Logikzahl 1, *L*-Pegel für die Logikzahl 0) wird die mit dem Logikplan nach Bild 10 dargestellte Verknüpfung gemäß **Bild 11** als Schaltung verwirklicht. Man vergleiche hiermit die Bilder 8 und 9.

Das Wichtigste über Ventil-Dioden

- Als Diode bezeichnet man heute meistens ein solches mit nur zwei Anschlüssen versehenes Halbleiter-Bauelement, bei dem Strom und Spannung für die eine Stromrichtung anders miteinander zusammenhängen als für die andere Stromrichtung.
- Es gibt viele Arten solcher Dioden. Von ihnen sind die Ventil-Dioden am meisten in Gebrauch.
- Als Dioden-Schaltzeichen dient ein mit einem Querstrich ergänztes Dreieck. Dieses zeigt, als Pfeilspitze aufgefaßt, die Durchlaßrichtung (konventionelle Richtung des Durchlaßstromes) an.
- Die Zählrichtungen für die Ventildioden-Spannung und den Ventildioden-Strom sind der Durchlaßrichtung gemäß gewählt.
- Deshalb gehören zu dem Sperrzustand negative Werte der Ventildioden-Spannung und des Ventildioden-Stromes.
- Erst für positive, den Wert der Dioden-Schleusenspannung übersteigende Werte der Dioden-Spannung hat die Ventil-Diode geringe Werte des Durchlaßwiderstandes. Von da an steigt die Durchlaßspannung mit zunehmendem Durchlaßstrom nurmehr wenig.
- Die Schleusenspannungen betragen für Germanium-Dioden bei 25 °C etwa 0,3 V und bei 60 °C ungefähr 0,2 V sowie für Silizium-Dioden dementsprechend rund 0,7 V und 0,5 V.

Komplementär-Transistoren in Blinkschaltung

Zonenfolge und Dotierung

Die meisten verwendeten Transistoren sind npn-Transistoren bzw. pnp-Transistoren. Mit npn- und pnp werden die Zonenfolgen des Transistorsystems gekennzeichnet. Damit steht es so: Den sich elektrisch verschieden verhaltenden Zonen der Halbleiter-Bauelemente sind die Zeichen n, p, i, n^+, p^+, n^{++} und p^{++} zugeordnet. Hier interessieren lediglich die n-Zone und die p-Zone. Was physikalisch damit gemeint ist, spielt im vorliegenden Zusammenhang keine Rolle.
Ein npn-Transistor hat ebenso wie ein pnp-Transistor zwei gleichartige Außenzonen und eine diesen entgegengesetzte Zwischenzone.
Nur für den daran interessierten Leser sei vermerkt: Es bedeuten: **i** Zonen völlig reinen Halbleitermaterials, **n** Halbleiterzonen mit solchen Fremdatomen dotiert, deren jedes ein freies Elektron zur Verfügung stellt, **p** Halbleiterzonen mit Fremdatomen dotiert, deren jedes ein freies Elektron aufnehmen kann. Die Pluszeichen deuten verstärkte Dotierungen an.

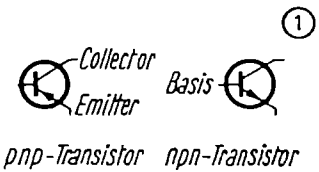
Komplementär-Transistoren

Einzelne Komplementär-Transistoren gibt es nicht. Mit Komplementär-Transistoren meint man ein Transistor-Paar, bestehend aus einem npn-Transistor und einem pnp-Transistor. Beide Transistoren werden mit gegensätzlicher Polung betrieben. Ihre Schaltzeichen unterscheiden sich daher mit der Richtung der Pfeilspitze, die in den den Emitter darstellenden Strich eingetragen ist (**Bild 1**). Die **Pfeilspitze** gibt die konventionelle Stromrichtung an. Das ist die Stromrichtung vom Plus-Anschluß eines Widerstandes durch diesen hindurch nach seinem Minus-Anschluß.

Blinkschaltung

Die Blinkschaltung ist eine Schaltung, die zwischen zwei Zuständen periodisch kippt, wobei als Lastwiderstand Lampen (meistens Glühlampen) dienen. Viele

Die Schaltzeichen für pnp- und npn-Transistoren. Der Unterschied besteht in der Richtung der Pfeilspitze im Emitterstrich.



① Bild 1

Blinkschaltungen gestatten es, zwei Glühlampen bzw. Glühlampengruppen gegensätzlich aufleuchten zu lassen. Doch beschränkt man sich bei den Blinkschaltungen meistens auf eine Glühlampe bzw. auf eine Glühlampengruppe mit dem Wechsel zwischen hell und dunkel.

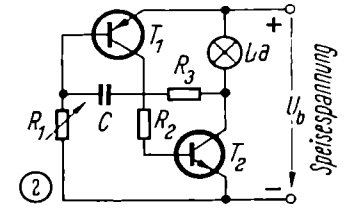
Verschiedenheit hinsichtlich der Bestückung

Eine mit zwei Transistoren derselben Zonenfolge (also entweder beide npn-Transistoren oder beide pnp-Transistoren) bestückte Blinkschaltung enthält außer der Glühlampe bzw. den Glühlampen und den beiden Transistoren im allgemeinen drei bzw. vier Widerstände sowie zwei Kondensatoren.
Bei Verwenden von Komplementär-Transistoren spart man einen Kondensator ein und kommt für den dementsprechend verbleibenden einen Kondensator mit einer bedeutend geringeren Kapazität aus, ohne daß sich damit kürzere Periodendauern (Spieldauern) ergeben.
Eine **Spieldauer** ist hier die Summe einer Hell-Zeitspanne und einer Dunkel-Zeitspanne.

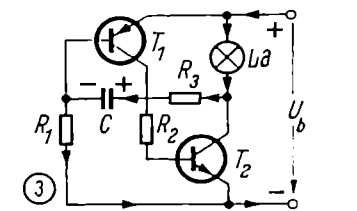
Ein Schaltungsbeispiel

Bild 2 zeigt die als Beispiel gewählte Schaltung. Sie funktioniert folgendermaßen:
Nach dem Einschalten wird der Kondensator C über die noch kalte Glühlampe sowie über die Widerstände R_1 und R_3 aufgeladen. Damit steigt der Betrag der negativen Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 an (**Bild 3**). Ist hierbei der Schwellwert (Schleusenwert) der Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 erreicht, so fließt durch den Transistor T_1 ein Strom. Dieser steuert als dessen Basisstrom den Transistor T_2 ebenfalls in den Durchlaßzustand.

Eine Blinkschaltung, die mit zwei einander komplementären Transistoren bestückt ist. Mit der Blinkschaltung wird die Glühlampe La periodisch ein- und ausgeschaltet.

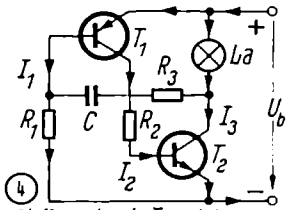


Im Anschluß an das Anlegen der Speisespannung U_b sind die Transistoren T_1 und T_2 zunächst gesperrt. Es fließt dabei nur ein den Kondensator C auf-ladender Strom.

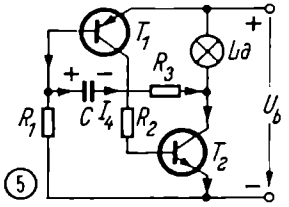


Kondensatorstrom bei Sperrzustand der Transistoren

Folglich sinkt die Collektor-Emitter-Spannung des Transistors T_2 auf einen kleinen Wert ab. Die so gegebene Spannungsänderung überträgt sich über den Kondensator C als zusätzliche negative Basis-Emitter-Spannung auf den Transistor T_1. Das beschleunigt dessen Übergang in den Durchlaßzustand. Mit dieser Wechselwirkung zwischen beiden Transistoren ergeben sich letzten Endes das Kippen der beiden Transistoren aus ihrem Sperrzustand in ihren Durchschaltzustand und so ein abrupter Anstieg des Glühlampenstromes. **Bild 4** veranschaulicht die die Transistoren nun durchfließenden Ströme.



Ströme durch Transistoren und Lampe



Kondensatorstrom bei Durchschaltzustand der Transistoren

Die während der Leuchtdauer fließenden Ströme (Lampenstrom und Kondensatorstrom).

Der Kondensator C liegt jetzt mit seinem in den Schaltplänen rechts eingetragenen Belag über den durchgeschalteten Transistor T_2 am Minuspol der Speisespannung und mit seinem anderen Belag über die Basis-Emitter-Strecke des gleichfalls durchgeschalteten Transistor T_1 am Pluspol der Speisespannung. Folglich ergibt sich nach dem Entladen des Kondensators ein Neuaufladen im Sinne des **Bildes 5.**

Hiermit kommt es zu einem Sperren des Transistors T_1, womit auch der Transistor T_2 in den Sperrzustand zurückfällt. Dieser Übergang erfolgt wegen der Rückkopplung über R_3 und C_1 ebenfalls sprunghaft. Danach beginnt ein Wiederholen des eben geschilderten Spiels.

Über die Bemessung

Beispielsweise gilt für eine Speise-Gleichspannung von 6,5 V und eine Lampe 6 V, 1,8 W : $R_1 \approx 500\ k\Omega$ linear $R_2 = 22\ \Omega$, $R_3 = 2{,}2\ k\Omega$, $C = 10\ \mu F$. Als Kondensator wählt man hierfür einen 6-V-Elektrolytkonden-

sator mit dem positiven Pol an der Basis des Transistors T_1. Der Transistor T_2 muß ein Leistungs-(npn)-Transistor sein (Verlustleistung maximal wenigstens 0,8 W, Collectorstrom maximal wenigstens 500 mA). Als T_1 genügt ein (pnp-)Vorstufen-Transistor.

Das Zeitverhalten

Mit diesem Ausdruck meint man den Einfluß des Zeitablaufs auf das Verhalten einer Schaltung. Hier handelt es sich um das periodische Schalten der Lampen. Dafür erhält man ungefähr folgende beiden Zeitspannen

$$\text{Leuchtdauer} \approx 5 \cdot C_1 \cdot R_2$$
$$\text{Pausendauer} \approx 0{,}7 \cdot C_1 \cdot (R_1 + R_2)$$

Eine wichtige Bedingung

R_1 muß einen höheren Wert haben als das Produkt aus dem Betriebswiderstand der Glühlampe und den **Collector-Basis-Gleichstromverhältnissen** der beiden Transistoren. Das Formelzeichen für ein solches Stromverhältnis ist *B*.

Durchlaß- und Durchschaltzustand

Man beachte: Hier wird zwischen Durchlaßzustand im allgemeinen und Durchschaltzustand im besonderen unterschieden.

Durchlaßzustand bedeutet Stromdurchgang durch den Transistor zwischen dessen Emitter und Collector, wobei es offenbleibt, um welchen Anteil von dem im gegebenen Fall höchstmöglichen bzw. höchstzulässigen Strom es sich handelt.
Mit **Durchschaltzustand** ist ein extremer Durchlaßzustand gemeint, bei dem die Collector-Emitter-Restspannung ein Volt erheblich unterschreitet und der den Transistor durchfließende Strom etwa den Wert annimmt, der unter den gegebenen Umständen maximal erreicht werden kann.

Wichtigstes über komplementäre Transistoren

- Zueinander komplementäre Transistoren haben bei sonst gleichem Aufbau entgegengesetzt dotierte Zonen.
- Den entgegengesetzten Dotierungen entsprechen die Zonenfolgen einerseits npn und anderseits pnp.
- Ein Komplementär-Transistorpaar besteht aus einem Transistor des npn-Typs und einem Transistor des pnp-Typs, wobei sich die beiden Transistoren gewissermaßen spiegelbildlich gleichen.
- Komplementäre Transistoren ermöglichen häufig den Aufbau einfacherer Schaltungen als Transistoren mit durchweg derselben Zonenfolge.
- Komplementär-Transistorpaare eignen sich z. B. für Gegentaktendstufen.

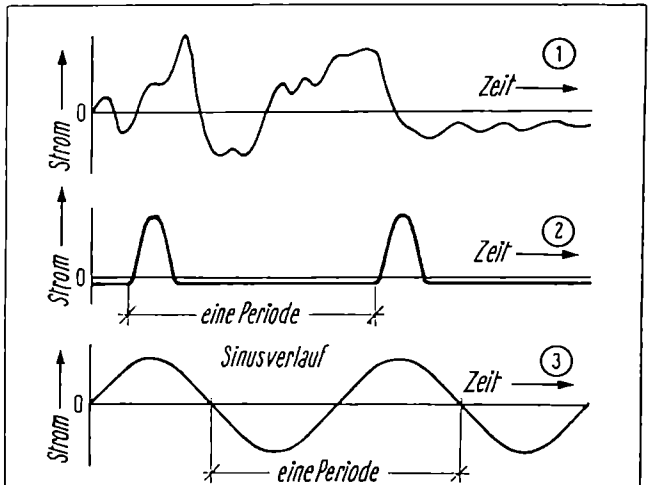
Wechselstrom und Wechselspannungsquellen

Wechselstrom — eine erste Erklärung

Ein Wechselstrom ist ein elektrischer Strom, dessen Stromrichtung häufig derart wechselt, daß sich daraus für das zeitliche Mittel der Wert Null ergibt. Beim Wechselstrom ist somit keine der beiden Stromrichtungen bevorzugt.
»Häufig« ist für das Stattfinden des Wechsels der Stromrichtung eine ungenaue Bezeichnung. Eine exakt festzulegende Grenze gibt es da nicht. Im allgemeinen dürfte »häufig« als »wenigstens mehrmals je Sekunde« aufgefaßt der Praxis einigermaßen entsprechen.

Beispiele für Wechselströme

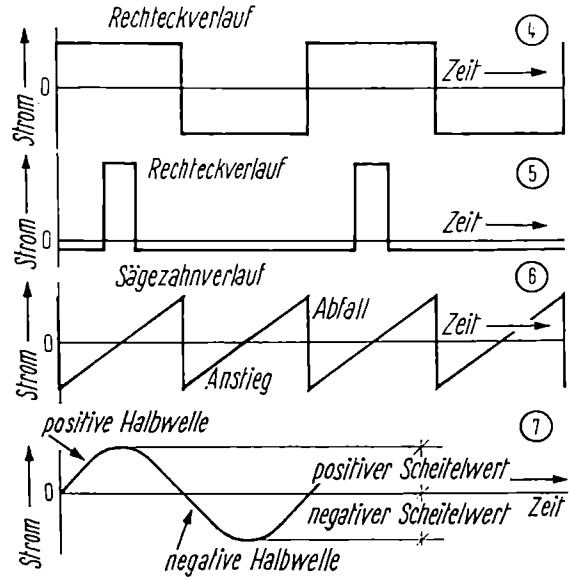
Der Verstärker-Ausgangsstrom, der für das Betreiben eines Lautsprechers benötigt wird, ist ein Wechselstrom. Solch ein Wechselstrom hat einen ganz unregelmäßigen zeitlichen Verlauf — etwa so, wie **Bild 1** das veranschaulicht. Ob es sich im Falle des Bildes 1 aber tatsächlich um einen reinen Wechselstrom handelt, kann aufgrund dieses Bildes nicht endgültig entschieden werden: Wegen der Unregelmäßigkeit des Verlaufs müßte dieser über eine lange Zeit verfolgt werden. Nur damit wäre es möglich festzustellen, ob der Mittelwert Null wäre, wie sich das für einen Wechselstrom gehört, oder nicht.



Drei Beispiele für Wechselströme. Nur in Bild 1 handelt es sich um einen nichtperiodischen zeitlichen Verlauf.

Anders ist es mit den Wechselströmen, wie sie den Bildern 2...6 entsprechen. Das sind **periodische Wechselströme:** Ihr zeitlicher Verlauf wiederholt sich ständig in derselben Weise.
Eine solche **Periode** zählt von einem beliebigen Zeitpunkt ausgehend bis zu dem Zeitpunkt, mit dem die

Wiederholung des zeitlichen Verlaufs des Strom-Augenblickswertes beginnt (**Bild 2**). Meistens wählt man dafür als Anfangszeitpunkt einen Zeitpunkt, in dem der Augenblickswert des Stromes durch Null hindurchgeht (**Bild 3**). Im Gegensatz zu Bild 3 geht man aber oft von demjenigen Nulldurchgang aus, mit dem der Strom-Augenblickswert das positive Vorzeichen annimmt.
Der in Bild 3 dargestellte Verlauf macht einen besonders harmonischen Eindruck. Er heißt — aus mathematischen Gründen — **Sinusverlauf.** Wenn man schlechtweg von Wechselströmen oder Wechselspannungen spricht, meint man fast immer solche mit Sinusverlauf.
Rechteckverlauf (sprunghafter Wechsel zwischen einem positiven und einem negativen zwischen zwei Wechseln konstanten Augenblickswert) gibt es mit gleichen Zeitspannen zwischen beiden Wechseln (**Bild 4**), aber auch mit ungleichen Zeitspannen (**Bild 5**).
Zu dem mit **Bild 6** gezeigten **Sägezahnverlauf** gehört — gleichen Zeitmaßstab wie in den Bildern 2 ... 5 vorausgesetzt — diesen Wechselströmen gegenüber die halbe Periodendauer. Eine Periodendauer umfaßt hier eine **Anstiegszeit** und eine **Abfallzeit.**



Drei für die Elektronik wichtige Wechselströme: Rechteckströme, ein Sägezahnstrom und ein Sinusstrom.

Ein paar Fachausdrücke

Ein zeitlich periodisch verlaufender Wechselstrom hat jeweils einen höchsten positiven und negativen Augenblickswert. Diese beiden Augenblickswerte werden **positiver** und **negativer Scheitelwert** genannt. **Bild 7** läßt die Scheitelwerte für den Fall des Sinusverlaufs erkennen. Besonders bei Sinusverlauf spricht man gemäß Bild 7 außerdem von der **positiven** und **negativen Halbwelle.** Manche Leute nennen diese Halbwellen auch **Halbschwingungen** — offenbar, weil sie übersehen,

daß da garnichts schwingt, oder weil sie von dem, was Schwingen heißt, eine falsche Vorstellung haben.
Beim Sinusverlauf weisen der positive und der negative Scheitelwert miteinander übereinstimmende Beträge auf. In Fällen, in denen dies zutrifft (vor allem aber im Zusammenhang mit dem Sinusverlauf), wird der Scheitelwert oft als **Amplitude** bezeichnet.
Bei zeitlich nicht sinusförmigem Verlauf gibt man mitunter statt der Scheitelwerte den zwischen beiden Scheitelwerten bestehenden Unterschied — oder, was auf dasselbe hinausläuft, die Summe der Beträge beider Scheitelwerte als »**Spitze-zu-Spitze-Wert**« an. Beispiel: Positiver Scheitelwert 11 mA, negativer Scheitelwert 6 mA. Daraus als
Unterschied 11 mA — (—6 mA) = 17 mA oder als Summe der Beträge 11 mA + 6 mA = 17 mA.

Periode und Frequenz

Eine jede Periode eines periodisch verlaufenden Wechselstromes hat die diesem Wechselstrom charakteristische, ständig gleichbleibende Dauer. Teilt man eine Sekunde durch diese Zeitdauer, so bekommt man damit als Ergebnis die Häufigkeit der Perioden je Sekunde. Statt Häufigkeit der Perioden je Sekunde sagt man »**Frequenz**« und nennt eine Periode je Sekunde ein **Hertz.** Demgemäß ist das Hertz (abgekürzt Hz) die **Einheit der Frequenz.** Ein Hertz bedeutet 1 je Sekunde. Also 1 Hz = 1 : (1 s).

Hierzu ein Beispiel: Die Frequenz f des Netzwechselstromes ist in Europa gleich 50 Hz. Dazu gehört eine Periodendauer T von

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50\ \text{Hz}} = \frac{1}{50}\ \text{s} = 0{,}02\ \text{s} = 20\ \text{ms}$$

Man beachte, daß ein Hertz wirklich einmal je Sekunde bedeutet: 1 Hz = 1 : (1 s)
Dies muß man wissen, wenn man in der Elektronik einwandfrei rechnen möchte.
In manchen Bereichen der Elektronik hat man es mit hohen und sehr hohen Frequenzen zu tun. Hierfür verwendet man als (vom Hertz) abgeleitete Einheiten:

das **Kilohertz**	1 kHz	= 1000 Hz	= 10^3 Hz
das **Megahertz**	1 MHz	= 1000 kHz	= 10^6 Hz
das **Gigahertz**	1 GHz	= 1000 MHz	= 10^9 Hz

Wenn man bedenkt, daß ein Jahr 365 Tage, ein Tag 24 Stunden, eine Stunde 60 Minuten und eine Minute 60 Sekunden hat, kann man errechnen, daß auf ein Jahr 365 · 24 · 60 · 60 s = 31 536 000 Sekunden treffen. Nun bedenke man: Die Netzfrequenz beträgt 50 Hz. Bei Fernsehübertragungen wird mit Frequenzen in der Größenordnung von 500 MHz gearbeitet. Diese Frequenzen verhalten sich zueinander wie 1 : 10 000 000. Wenn also eine Periodendauer zu der Frequenz von 500 MHz mit einer Sekunde verglichen würde, so entspräche damit die Periodendauer zur Netzfrequenz dem 10 000 000-fachen einer Sekunde oder einer Zeitspanne von rund vier Monaten!

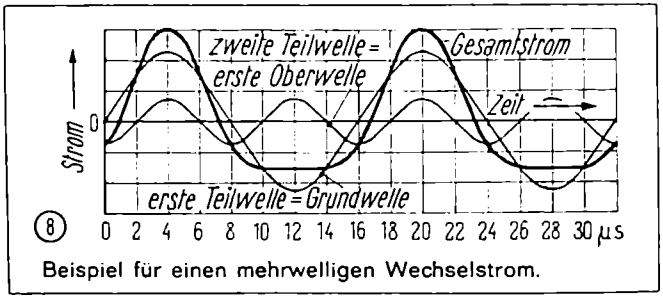
Grundwelle und Oberwellen

Es gibt zeitlich periodisch verlaufende Wechselströme, deren Verlauf vom Sinusverlauf abweicht. Diese Wechselströme können aber als Summen zeitlich sinusförmig verlaufender Wechselströme aufgefaßt werden, deren Frequenzen sich mit ganzzahligen Faktoren voneinander unterscheiden. Das gilt sogar für Wechselströme, deren Verlauf den Bildern 2, 4, 5 und 6 entspricht! Je schärfer die Ecken, die sich beim Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs ergeben, desto höhere Frequenzen sind in einer solchen Summe vertreten.

Übrigens: Diese Summen bestehen durchaus nicht nur in der Auffassung. Die einzelnen Anteile solcher Summen kann man mit darauf abgestimmten Resonanzschaltungen herausfiltern!

Ein ganz einfaches Beispiel zeigt **Bild 8,** woran gleich auch noch die hier einschlägigen Fachausdrücke erklärt werden sollen. In Bild 8 ist der zeitliche Verlauf eines Wechselstromes aufgetragen, der aus einem Anteil mit einer bestimmten Frequenz und einen zweiten Anteil mit der zweimal so hohen Frequenz besteht.

Dazu gibt es mehrere Bezeichnungen. Als deren Grundlage verwendet man die Frequenz, die aus der Periodendauer eines periodischen (mehrwelligen) Stromes folgt. Diese Frequenz nennt man **Grundfrequenz.** Dazu gehört die **Grundwelle** (siehe Bild 8). Hierauf basierend hat man folgende Bezeichnungen:



Beispiel für einen mehrwelligen Wechselstrom.

Grundwelle mit Grundfrequenz, auch **1. Teilwelle**
1. Oberwelle mit 2 x Grundfrequenz, auch **2. Teilwelle**
2. Oberwelle mit 3 x Grundfrequenz, auch **3. Teilwelle**

Statt Teilwelle sagt man auch **Harmonische.**

Eine Wechselgröße, die wenigstens zwei Teilwellen umfaßt, bezeichnet man als **mehrwellige Wechselgröße.** Manche Leute gebrauchen auch in diesem Zusammenhang das Wort **Schwingung** statt **Welle.** Das ist falsch, wenn man es da nicht ausgerechnet mit Schwingungen zu tun hat.

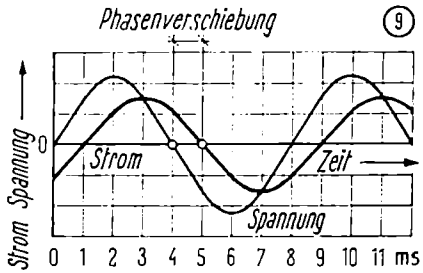
Phasenverschiebung

Zwei Sinus-Wechselströme mit derselben Frequenz oder etwa auch ein Sinus-Wechselstrom und eine zu ihm gehörende Sinus-Wechselspannung mit derselben Frequenz können gleichphasig oder gegeneinander phasenverschoben sein.

Gleichphasigkeit bedeutet gleichzeitigen Nulldurchgang des Augenblickswertes mit übereinstimmendem Vorzeichenwechsel, d. h. zeitliches Zusammenfallen einerseits der positiven und anderseits der negativen Halbwellen.

Phasenverschiebung ist Abweichen von der Phasengleichheit. Die Phasenverschiebung gibt man manchmal als Bruchteil einer Periode, häufiger aber, wie später dargelegt, als Winkel an. **Bild 9** veranschaulicht eine Phasenverschiebung zwischen einer Wechselspannung und einem Wechselstrom. Sie beträgt ein Achtel einer Periode. Der Wechselstrom **eilt** der Wechselspannung um ein Achtel einer Periode **nach:** Der Strom-Nulldurchgang folgt dem ihm entsprechenden Spannungs-Nulldurchgang in dem zeitlichen Abstand von einer Millisekunde.

Falls zwei Wechselströme bzw. zwei Wechselspannungen derselben Frequenz gleichzeitig durch Null gehen, dabei aber ihre Vorzeichen entgegengesetzt wechseln, so sagt man, sie seien **gegenphasig.**



Sinus-Wechselspannung und ein ihr um ein Achtel einer Periode (um 45 °) nacheilender Sinuswechselstrom.

Wechselspannungs-Polung

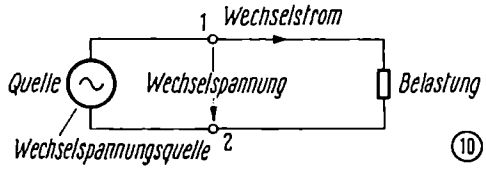
Bei Gleichspannungen ist häufig die Polung zu beachten, d. h. man muß Pluspol und Minuspol der Spannung unterscheiden. Bei Wechselspannungen wechselt die Polung ständig: Einmal stellt der eine und wechselweise damit der andere Anschlußpunkt den Pluspol dar. Das kann zu der Meinung führen, man habe bei Wechselspannungen gegebenenfalls nur zwischen geerdetem Pol und nicht geerdetem Pol zu unterscheiden.

Dagegen ist dann nichts einzuwenden, wenn es sich allein um eine einzelne Wechselspannung handelt. Sonst aber spielt die Polung doch eine — manchmal sogar eine ausschlaggebende — Rolle. Das zeigt bereits ein kurzes Studium von **Bild 10:** In den Zeitspannen, in denen die dem eingetragenen Pfeil entsprechende Spannung des Anschlußpunktes 1 **gegen** den Anschlußpunkt 2 positiv ist, hat die Spannung des Punktes 2 **gegen** den Punkt 1 negative Werte und umgekehrt. Wenn die Wechselspannung dieser Quelle mit der Wechselspannung einer zweiten Quelle bei übereinstimmender Frequenz zusammengefaßt werden soll, kommt es ganz auf die gegenseitigen Polungen an.

Mit dem Festlegen der Wechselspannungs-Zählrichtung wird entschieden, welche der beiden Spannungshalbwellen als positiv anzusehen ist.

Wechselstromrichtung

Auch da gibt es, wie schon die Bilder 1 ... 9 zeigen, eine positive und eine negative Richtung. Die Richtung die man als positiv festlegen will, kennzeichnet man in einem Schaltplan mit einer in den Leitungsstrich eingetragenen Pfeilspitze (siehe Bild 10). Es ist zweckmäßig, die Polung der Spannung dort, wo man die Zusammenhänge übersieht mit der Stromrichtung in Einklang zu bringen. Das ist in Bild 10 geschehen: Einem positiven Augenblickswert der Spannung U_{12} (Spannung des Punktes 1 **gegen** den Punkt 2) ist ein positiver Strom von Punkt 1 durch den Belastungswiderstand nach dem Punkt 2 zugeordnet.



Ein Wechselstromkreis, bestehend aus einer Wechselstromquelle (allgemeines Schaltzeichen), den Verbindungsleitungen und einer als Widerstand eingetragenen Belastung.

Mit dem Festlegen der Wechselstrom-Zählrichtung wird dargetan, welcher der beiden Wechselstrom-Halbwellen das positive Vorzeichen zukommt.

Wechselstrom und Wechselspannung

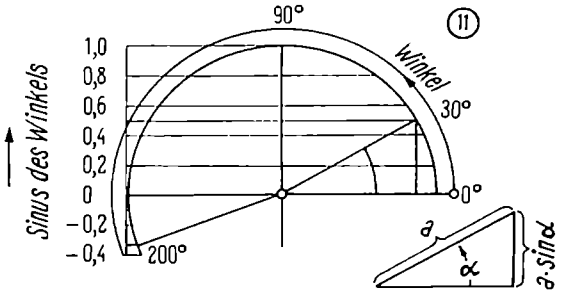
Die Bilder 1 ... 9 zeigen zwar den zeitlichen Verlauf von Wechselströmen. Abgesehen von den auf den Strom hinweisenden Beschriftungen können sie aber ebenso auch als Darstellungen des zeitlichen Verlaufs von Wechselspannungen gelten.
Augenblickswert, Scheitelwert, Periode, Frequenz, Hertz, Halbwelle, Grundwelle, Oberwelle, Teilwelle, Phasengleichheit, Phasenverschiebung und Gegenphasigkeit gelten für Wechselspannungen genau so wie für Wechselströme.
Hier muß sowohl für den Sinus-Wechselstrom wie auch für die Sinus-Wechselspannung etwas nachgeholt werden. Der Wert, mit dem diese beiden Größen wirksam werden, ist natürlich kleiner als deren Scheitelwert. Der Scheitelwert tritt nämlich während jeder Periode nur zweimal (einmal positiv, einmal negativ) auf. Deshalb braucht man einen wirksamen Wert, einen Wert, der für die Wirkung maßgebend ist.
Es sei an dieser Stelle nur erwähnt, daß sich bei Sinus-Wechselströmen und Sinus-Wechselspannungen der wirksame Wert, allgemein **Effektivwert** genannt, auf das $1 : \sqrt{2}$-fache $\approx$ 0,707-fache des Scheitelwertes beläuft.

Vom Sinus

Dieser Abschnitt kann notfalls überschlagen werden. Er ist nur für die Leser eingefügt, die etwas mehr über den Sinus wissen möchten. Zunächst das Wort »Sinus«. Es bedeutet »Busen« das hängt mit der Sinuslinie zusammen (siehe z. B. die ersten drei Halbwellen in Bild 3). Von der Schule her wird mancher Leser noch wissen: »In einem rechtwinkligen Dreieck ist der Sinus eines der beiden spitzen Winkel mit dem Verhältnis der gegenüberliegenden Kathete zur Hypotenuse dieses Dreiecks gegeben«. Ordnet man der Hypotenuse die Länge 1 zu, so bedeutet die Länge der gegenüberliegenden Kathete unmittelbar den Sinus des Winkels (siehe **Bild 11** rechts unten).
Der Sinus ist jedoch nicht auf die spitzen Winkel des rechtwinkligen Dreiecks beschränkt. Bild 11 zeigt in seinem übrigen Teil zunächst, daß sin 30° = 0,5. Es läßt weiter erkennen, daß sin 90° = 1 und daß sin 200° ≈ —0,34. Hierauf beruht das, was im folgenden Abschnitt enthalten ist.

Zeigerdarstellung bei zeitlichem Sinusverlauf

Einen ebensolchen zeitlichen Verlauf, wie er dem **Bild 12** entspricht, hat die Schattenlänge eines mit gleichbleibender Geschwindigkeit umlaufenden Zeigers, wenn die Lichtrichtung senkrecht zur Zeigerachse steht



Sinus eines Winkels: In der Schule lernt man: Der Sinus eines Winkels in einem rechtwinkligen Dreieck ist gegeben mit dem Verhältnis der dem Winkel gegenüberliegenden Kathete des rechtwinkligen Dreiecks zu dessen Hypotenuse (im Bild rechts unten).

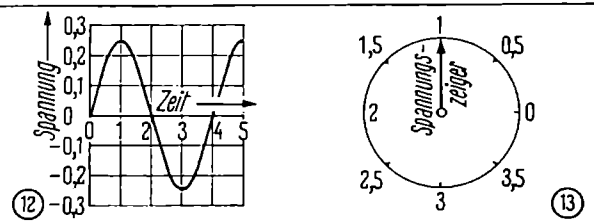


Bild 12 zeigt eine zeitlich sinusförmig verlaufende Spannung. Dabei wurde die Dauer eines Viertels einer Periode gleich 1 gesetzt. In Bild 13 ist ein Zeiger dargestellt, der (entgegen dem Uhrzeiger) umlaufend zu denken ist. Die Dauer eines Zeiger-Umlaufs soll mit der Dauer einer Periode der Wechselspannung übereinstimmen.

und der Schatten des Zeigers auf eine zur Lichtrichtung senkrechte Ebene fällt. Dies wird ausgenutzt, um den zeitlichen Verlauf von Sinus-Wechselgrößen mit Zeigern abzubilden und die **Zeiger** den (deshalb als **symbolisch** bezeichneten) **Rechnungen** zugrundezulegen.
Man studiere den Zusammenhang zwischen dem Bild 12 und dem **Bild 13.** Dieses Studium wird damit erleichtert, daß die Zahlen, die in Bild 12 an der Zeitachse stehen, den in Bild 13 am Kreis eingetragenen Zahlen entsprechen. Der Kreis wird bei umlaufendem Zeiger von der Zeigerspitze beschrieben. Zur Zahl Null (d. h. zum Wert Null des Augenblickswertes) liegt der Zeiger hier waagerecht. Zum positiven Scheitelwert gehört dabei die senkrechte Stellung (Wert 1).

Mit der Darstellung einer Sinus-Wechselgröße nach Bild 13 wird deutlich, daß einer Periode der volle Winkel (360°) zugeordnet ist. In diesem Sinne gibt man Phasenverschiebungen meistens als Winkel an. So bedeuten eine Phasenverschiebung von einem Viertel einer Periode eine solche von 90° und die mit Bild 9 gezeigte Phasenverschiebung von einem Achtel einer Periode eine Phasenverschiebung von 360° : 8 = 45°. Früher war es üblich, diese Zeiger, die Sinus-Wechselgrößen symbolisch darstellen, Vektoren zu nennen. Das tut man nicht mehr. »**Vektor**« ist nämlich die Bezeichnung für einen Wert, der außer einem Betrag auch eine Richtung im Raum betrifft (wie etwa eine Kraft).

Wichtigstes über Wechselstrom und Wechselspannung

- Wechselströme und Wechselspannungen gibt es mit nichtperiodischem und periodischem zeitlichem Verlauf. In der Technik kommt vor allem letzterer in Frage.
- Periodisch nennt man einen Verlauf, der sich in ständig gleicher Weise oft wiederholt.
- Für den periodischen Verlauf kann man dessen Frequenz angeben. Das ist die auf eine Sekunde entfallende Zahl seiner Perioden.
- Eine Periode ist die Zeitspanne zwischen einem beliebigen Zeitpunkt eines periodischen Verlaufs und dem Zeitpunkt, in dem die Wiederholung des Verlaufs beginnt.
- Besonders wichtig ist unter den vielen Möglichkeiten des periodischen Verlaufs der Sinusverlauf.
- Der Sinusverlauf kann (symbolisch) mit einem gleichmäßig umlaufend gedachten Zeiger dargestellt werden. Die Zahl der (gedachten) Umläufe je Sekunde bedeutet die Frequenz.
- Ein Umlauf des Zeigers entspricht einem vollen Winkel (360°). Hieraus folgt, daß Phasenverschiebungen zwischen zwei Sinus-Wechselgrößen derselben Frequenz als Winkel angegeben werden.
- Wenn auch die Zeigerlängen eigentlich den Scheitelwerten der Sinusspannung bzw. des Sinusstromes entsprechen sollten, bemißt man sie meistens den Effektivwerten gemäß.

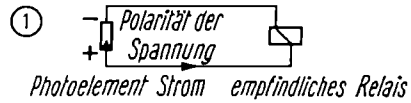
Photoelement als Lichtfühler

Über Photoelemente

Ein Photoelement ist ein Halbleiter-Bauteil mit zwei Anschlüssen, zwischen denen bei Einwirken von Licht- oder Infrarot-Strahlung eine Spannung auftritt.
Photoelemente gibt es in sehr verschiedenen Ausmaßen der licht- bzw. strahlungsempfindlichen Fläche. Besonders große Ausmaße dieser Fläche haben die Photoelemente, die als Stromquellen zum Speisen von Geräten — z. B. auch für Satelliten — verwendet werden. Solche Zellen nennt man häufig »**Solarzellen**«, weil diese üblicherweise für Sonnenlicht-Bestrahlung verwendet werden. Es stehen aber auch kleine Photoelemente — etwa solche zum Abtasten von Lochkarten — zur Verfügung.
Heute sind die Photoelemente meistens Silizium-Bauteile. Früher hatte man als Photoelemente **Selenzellen.**

Relais von Photoelement unmittelbar gesteuert

Bild 1 veranschaulicht eine Schaltung, in der lediglich ein Photoelement und die Wicklung eines elektromagnetischen Relais in einem Stromkreis enthalten sind.

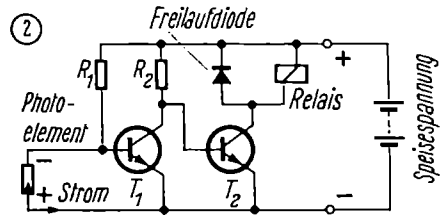


Stromkreis, in dem die Ausgangsleistung eines großen, bestrahlten Photoelements (Licht- oder Infrarotstrahlung) unmittelbar ein empfindliches elektromagnetisches Relais betätigt.

Das hier verhältnismäßig große Photoelement dient als Stromquelle. Bei Lichteinwirkung entsteht im Photoelement eine Spannung. Diese bewirkt den die Relaiswicklung durchfließenden Strom.
Man beachte: Die im Schaltzeichen mit dem schwarzen Dreieck gekennzeichnete Anode nimmt gegen die dort nicht gekennzeichnete Katode eine positive Spannung an. Die (konventionelle) Stromrichtung geht somit im äußeren Teil des Stromkreises von der Anode nach der Katode.

Photoelement mit zweistufigem Verstärker

Diese Schaltung (**Bild 2**) ist ebenso wie die Schaltung nach Bild 1 nur für solche Fälle geeignet, in denen es sich um Lichteinwirkungen handelt, bei denen die Be-



Lichtrelais mit zweistufigem Verstärker. Bei nicht belichtetem bzw. nicht bestrahltem Photoelement befinden sich der Transistor T_1 im Durchschaltzustand und der Transistor T_2 folglich im Sperrzustand.

leuchtung bzw. die Bestrahlung des Photoelements sprunghaft zwischen denjenigen Wertebereichen wechselt, deren einer dem angezogenen und deren anderer dem abgefallenen Relaisanker zugeordnet sind.

Für **schleichende Änderungen** der Lichteinwirkung (langsame Übergänge zwischen den zwei eben gekennzeichneten Wertebereichen) sind diese Schaltungen nicht zu empfehlen, da sie sich im Übergangsbereich nicht eindeutig verhalten.

Nun zurück zu der Schaltung, deren Schaltplan in Bild 2 enthalten ist:

Bei fehlendem oder schwachem Einwirken von Licht bzw. von Infrarotstrahlung auf das Photoelement ist der Transistor T_1 über den Widerstand R_1 durchgesteuert. Er erhält über diesen Widerstand den dazu erforderlichen (positiven) Basisstrom.

Bei starker Lichteinwirkung ergibt sich am Photoelement eine Spannung mit der in Bild 2 eingetragenen Polarität. Diese Spannung bewirkt einen das Photoelement in Richtung der eingetragenen Pfeilspitze gemäß durchfließenden Strom. Er setzt den über R_1 gehenden Strom fort. Damit bricht die bisher vorhandene positive Basis-Emitterspannung des Transistors T_1 bis auf einen geringen Wert zusammen. Mit dem Bemessen des Widerstandswertes von R_1 und der Wahl des Photoelements erreicht man, daß die Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 jetzt unter etwa 0,7 V bleibt und dieser Transistor deshalb gesperrt ist. Mit dem Sperren des Transistors T_1 entfällt dessen Collectorstrom, der den Widerstand R_2 durchfloß. Folglich erhält nun der Transistor T_2 über den Widerstand R_2 einen Basisstrom, der diesen Transistor durchschaltet. Das Relais wird daher von dessen Collectorstrom durchflossen und zieht seinen Anker an.

Geht die Lichteinwirkung dafür weit genug zurück, so wird der Transistor T_1 entsperrt. Daraus ergibt sich für den Transistor T_2 der Sperrzustand: Sein Collectorstrom setzt aus und der Relaisanker fällt ab. Der beim Sperren des Transistors T_2 gerade noch fließende Relaisstrom kann über die Freilaufdiode abklingen. Hiermit wird das Auftreten einer Abschalt-Überspannung verhindert.

Bemessungsvorschlag für 24 V Speisespannung

Transistoren U_{CEO} wenigstens 30 V, höchstzulässige Verlustleistung mindestens für T_1 : 100 mW, für T_2 1,5 W, Diode D_1 für wenigstens 30 V und 250 mA, R_1 = 280 kΩ, R_2 = 2 kΩ, Relaiswiderstand 100 Ω, Photoelement bei 100 lx etwa 200 mV und mindestens 40 nA/lx.

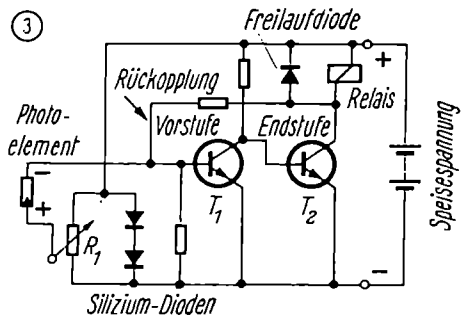
Photoelement als Lichtfühler für eine Kippschaltung

Bild 3 betrifft eine von einem Photoelement gesteuerte Kippschaltung. Eine solche Schaltung funktioniert auch dann noch einwandfrei, wenn sich die Beleuchtungsstärke des Photoelements langsam ändert: Diese Kippschaltung wechselt zwischen zwei Zustanden:

- ein Zustand: durchgeschalteter Transistor T_1 und gesperrter Transistor T_2, Relaisanker abgefallen,
- anderer Zustand: gesperrter Transistor T_1 und durchgeschalteter Transistor T_2, Relaisanker angezogen.

Die Übergänge zwischen den beiden Zuständen des Transistors T_2 erfolgen sprunghaft.

Die Beleuchtungsstärke, bei der das Photoelement die Schaltung mit der in ihm auftretenden Spannung beeinflußt, ist dabei höher als die Beleuchtungsstärke, bei der die Photoelement-Spannung sich auf den Zustand der Schaltung (wegen ihres dann geringeren Wertes) nicht mehr auswirken kann. Das bezeichnet man als Schaltintervall.



Lichtrelais mit Kippschaltung. Am Widerstand R_1 wird die Schaltung so eingestellt, daß der Transistor T_1 bei nicht beleuchtetem bzw. nicht bestrahltem Photoelement gerade noch durchgeschaltet ist. Dazu gehört der Sperrzustand des Transistors T_2.

Zum Durchlaßzustand eines Silizium-npn-Transistors gehört ein Mindestwert der Basis-Emitter-Spannung von ungefähr 0,7 V. Die Leerlaufspannung eines Photo-Elementes beträgt aber nur etwa 0,5 V. Deshalb muß hier für eine Basis-Emitter-Vorspannung gesorgt werden. Diese wird mittels eines Widerstandes mit einstellbarem Abgriff von der Reihenschaltung zweier in Durchlaßrichtung gepolter Silizium-Dioden abgegriffen.

Die Vorspannung wählt man so, daß der Transistor T_1 bei fehlender bzw. unter dem Schaltwert liegender Lichteinwirkung im Durchschaltzustand verbleibt.

Bei darüber hinausgehender Lichteinwirkung wird der Transistor T_1 von der Photo-Element-Spannung gesperrt. Wegen des damit gegebenen Wegfalls des Collectorstromes des Transistors T_1 bekommt der bisher gesperrte Transistor T_2 eine positive Basis-Emitter-Spannung, die ihn entsperrt.
Beim Einsetzen des Stromes durch die Relaiswicklung ergibt sich am Relais ein Spannungssprung. Dieser wird über den Widerstand im Rückkopplungszweig auf die Basis des Transistors T_1 zurückübertragen. Das beschleunigt dessen Sperren und sichert dessen Sperrzustand.
Das beschleunigte Sperren des Transistors T_1 wirkt sich auf den Transistor T_2 aus: Es unterstützt dessen Übergang vom Sperrzustand in den Durchlaßzustand. Infolge dieser Wechselwirkung finden der Übergang

- des Durchlaßzustandes des Transistors T_1 in dessen Sperrzustand und damit

- der Wechsel des Sperrzustandes des Transistors T_2 aus dem Sperrzustand in den Durchschaltzustand als Kippen der Schaltung statt.

Das Ergebnis des Überschreitens eines bestimmten (am Widerstand R_1 einstellbaren) Grenzwertes der Photoelement-Beleuchtungsstärke ist daher der jetzt angezogene Relaisanker.

Nun sei der Übergang von diesem Zustand auf den anderen der beiden möglichen Zustände der Schaltung betrachtet.
Wenn die Photoelement-Beleuchtungsstärke auf den Wert abgesunken ist, bei dem das eben erwähnte Kippen stattfand, passiert noch nichts:
Der Transistor T_2 befindet sich jetzt im Durchschaltzustand. Deshalb ist das Bild 3 rechts eingetragene Ende des Rückkopplungszweiges über den durchgeschalteten Transistor T_2 mit dem Minuspol der Speisespannung verbunden. Daraus folgt eine geringere positive Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 als bei gesperrtem Transistor T_2. Der Transistor T_1 wird deshalb erst entsperrt, wenn die Photoelement-Spannung weiter abgesunken ist:
Schließlich endet der Sperrzustand des Transistors T_1 bei weiterer Abnahme der Beleuchtungsstärke des Photoelements. Damit setzt sein Collectorstrom ein. Seine Collector-Emitter-Spannung sinkt wegen der nun auf den Collectorwiderstand entfallenden Spannung ab. Das hat das Sperren des Transistors T_2 zur Folge. Über den Rückkopplungszweig wird hiermit das Durchschalten des Transistors T_1 beschleunigt. Also erfolgt der Übergang der Schaltung vom

- Sperrzustand des Transistors T_1 und dem Durchschaltzustand des Transistors T_2 in den

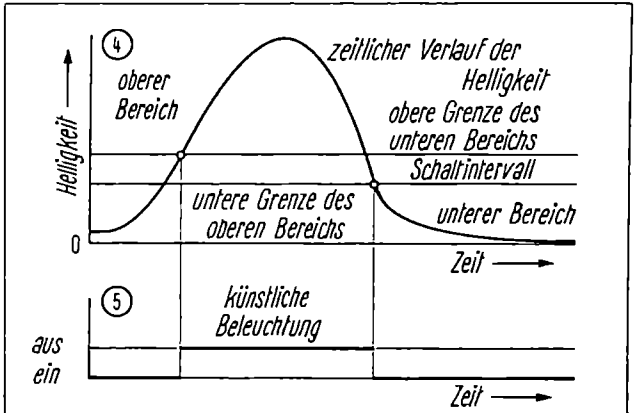
● Durchschaltzustand des Transistors T_1 und den Sperrzustand des Transistors T_2
wiederum als Kippen, wobei natürlich der Relaisanker abfällt.

Bemessungsvorschlag für die Schaltung nach Bild 3

Als Grundlage der Bemessung ist eine Speise-Gleichspannung von 12 V vorausgesetzt. Der Transistor T_1 darf ein npn-Vorstufen-Transistor sein. Sogar für die Endstufe kann hier ein solcher Vorstufentransistor gewählt werden. D_1 und D_2 sind zwei Silizium-Dioden. Auch D_3 ist eine solche Diode. Die Anforderungen an die Sperrspannungen und Durchlaßströme dieser Dioden sind gering. Man wählt einheitlich einen kleinen Typ. Das Photoelement braucht gleichfalls keine besonderen Ansprüche zu erfüllen. $R_1 = 25\ k\Omega$, linear. Widerstand zwischen Basis und Emitter von T_1 ebenso wie Collectorwiderstand für T_1 etwa 68 kΩ, Widerstand im Rückkopplungszweig ungefähr 4 MΩ.

Das Schaltintervall

Hierunter versteht man, daß die Werte der ein Schalten bewirkenden Steuergröße für Ein- und Ausschalten voneinander abweichen. Der damit gegebene Werte-Unterschied ist das Schaltintervall (**Bilder 4** und **5**).

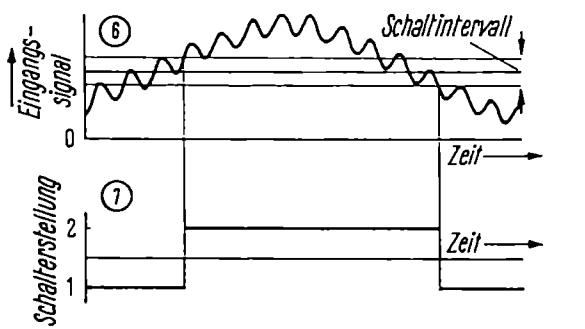


Zeitlicher Helligkeitsverlauf (oben) und hiervon beeinflußter Schaltzustand einer Beleuchtung.

Die **Steuergröße** ist entweder unmittelbar eine Spannung oder z. B. eine Temperatur oder eine Leuchtdichte oder ein Füllstand.
Man könnte zunächst einmal meinen, ein solches Schaltintervall sei nur von Nachteil. Irgendwie erinnert es an einen toten Gang.
Doch kommt man überall da, wo sich der Wert der Steuergröße über den Schaltbereich hinweg schleichend (also nicht sprunghaft) ändert, ohne Schaltintervall kaum aus:

Bei fehlendem Schaltintervall wären der Einschaltwert und Ausschaltwert der Steuergröße identisch. Hiermit könnte es beim langsamen Passieren dieses Wertes zum »Hin- und Her-Schalten« kommen. Manchmal sorgt man für ein größeres Schaltintervall. Dies ist erwünscht, wenn (kleinere) Schwankungen des Wertes der Steuergröße sich nicht auswirken sollen. Siehe hierzu die **Bilder 6** und **7.**

Der das Schaltintervall betreffende Spannungs-Unterschied wird gelegentlich **Intervallspannung** oder **Hysteresespannung** genannt.



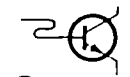
Aufgrund des Schaltintervalls bleiben schwächere Schwankungen des Eingangssignals ohne Einfluß.

Wichtigstes über Photoelemente

- Ein Photoelement ist ein Halbleiter-Bauelement, in dem bei Lichteinwirkung auf seine lichtempfindliche Fläche eine elektrische Spannung auftritt.
- Größere Photoelemente können bei genügend starker Lichteinwirkung Leistungen abgeben, mit denen Relais unmittelbar zu betätigen und Schaltungen zu speisen sind.
- Kleinere Photoelemente verwendet man zum Steuern von nachgeschalteten Verstärkern oder von Kippschaltungen.
- Hierfür haben Photoelemente gegenüber Photoleitern und Photodioden den Vorteil des Fehlens eines Dunkelstromes.
- Der Dunkelstrom ist ein das photoelektronische Bauelement bei fehlender Lichteinwirkung durchfließender Strom.
- Die Trägheit der (kleineren) Photoelemente ist etwas größer als die der Photodioden, aber wesentlich geringer als die der Photoleiter.
- Die Photoelement-Urspannung (Leerlaufspannung) beträgt bei 100 lx (100 ... 200) mV und bei 10000 lx (200 ... 450) mV.
- Der Photoelement-Kurzschlußstrom wird je Lux angegeben, weil er der Beleuchtungsstärke proportional ist. Seine Werte liegen zwischen 50 nA und 1000 nA je Lux. 1 nA (ein **Nanoampere**) = 10^{-9} A.

Phototransistor in einem Lichtrelais

Ein Schaltzeichen, wie man es für Phototransistoren ohne Basisanschluß da und dort antrifft.



①

Phototransistoren

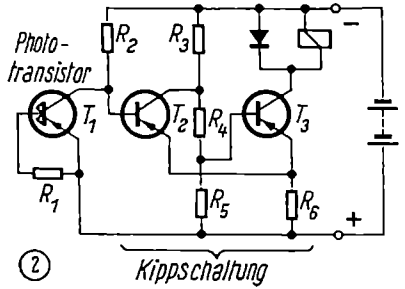
Ein Phototransistor ist ein Halbleiter-Bauelement, dessen Leitwert bei Beleuchten oder Infrarotbestrahlen ansteigt. Das System eines Phototransistors hat im Prinzip denselben Aufbau wie das System eines pnp- oder npn-Transistors.
Das Gehäuse eines Phototransistors hat natürlich ein Fenster, durch das die Strahlung auf die strahlungsempfindliche Fläche des Transistorsystems fallen kann.
Die Lichtempfindlichkeit der Phototransistoren ist weit höher als die der Photodioden und Photoelemente (ganz überschlägig das Hunderfache).
Phototransistoren werden aus Germanium bzw. aus Silizium gefertigt.
Ein **Germanium-Phototransistor** hat — wie einer der sonstigen pnp-Transistoren — außer dem Collector- und Emitter-Anschluß auch einen Basis-Anschluß. Dieser Anschluß dient hier nicht als Steuerelektrode, sondern nur als Möglichkeit für ein Verbinden der Basis mit dem Emitter über einen höheren Widerstand. Hiermit vermindert man vor allem die Einflüsse von Temperaturschwankungen auf den Collector- bzw. Emitter-Strom.
Die **Silizium-Phototransistoren** werden teilweise ohne Basis-Anschluß geliefert. Für den Fall des fehlenden Basisanschlusses wird z. B. auch das in **Bild 1** gezeigte Schaltzeichen verwendet.

Lichtrelais

Als Lichtrelais bezeichnet man eine mit einem Lichtfühler ausgestattete Relaisschaltung. Die Schaltung selbst ist dabei meistens eine Kippschaltung, so daß sich ein solches Lichtrelais auch für die Fälle eignet, in denen sich das auf den Lichtfühler einwirkende Licht schleichend ändern kann.

Eine Lichtrelaisschaltung

Das **Bild 2** zeigt den Schaltplan. Die Basis des Germanium-Phototransistors T_1 steht hier über einen Wider-



Lichtrelais-Schaltung, in der das Belichten des Phototransistors das Anziehen des Relaisankers bewirkt. Der Phototransistor steuert hier einen Schmitt-Trigger. Der Transistor T_3 arbeitet daher als Schalter.

stand (Größenordnung 10 kΩ ... 100 kΩ) mit dem Emitter in Verbindung. Der Phototransistor beeinflußt die die Transistoren T_2 und T_3 enthaltende Kippschaltung.

Funktion der Schaltung

Bei fehlender Lichteinwirkung ist der Phototransistor T_1 gesperrt. Dabei bekommt der Transistor T_2 einen (negativen) Basisstrom, der diesen Transistor durchschaltet. Der Emitterstrom des Transistors T_2 geht durch den Widerstand R_6, während sein Collectorstrom den Widerstand R_3 durchfließt. Die Widerstände R_3, R_4, R_5 und R_6 werden so bemessen, daß der Transistor T_3 bei durchgeschaltetem Transistor T_2 gesperrt ist.

Mit zunehmender Lichteinwirkung auf den Phototransistor T_1 läßt dieser Transistor einen immer höheren Strom durch. Der Strom hat am Widerstand R_2 eine Spannung mit wachsendem Betrag zur Folge. So kommt es schließlich zu einer entscheidenden Abnahme des Stromes, der den Transistor T_2 durchfließt. Folglich nimmt die am Widerstand R_3 herrschende Spannung ab. Ebenso geht auch der Betrag der Spannung am Widerstand R_6 zurück. Beides bedeutet für den Transistor T_3, der bisher gesperrt ist, eine zunehmende negative Basis-Emitter-Spannung.

Sowie damit die Basis-Emitter-Schwellenspannung erreicht ist, mit der der Transistor T_3 entsperrt wird, steigen der Strom, der den Widerstand R_6 durchfließt und mit ihm die am Widerstand R_6 auftretende Spannung an. Aufgrund dessen wird das Sperren des Transistors T_2 beschleunigt, was das Kippen des Transistors T_3 in den Durchschaltzustand unterstützt. Der Übergang vom Sperrzustand des Transistors T_3 in dessen Durchlaßzustand und das damit gekoppelte Sperren des Transistors T_2 erfolgen deshalb nach Art eines Kippens, d. h. sprunghaft. Der Collectorstrom des Transistors T_3 durchfließt jetzt die Relaiswicklung und bewirkt so das Anziehen des Relais-Ankers.

Wenn später die Lichteinwirkung derart abnimmt, daß aufgrund des sinkenden Collectorstromes des Transi-

stors T_1 der Transistor T_2 entsperrt wird, kippt die mit den Transistoren T_2 und T_3 bestückte Schaltung in den Ruhestand zurück. Dabei fällt der Relais-Anker ab.
Die Freilaufdiode läßt, wie üblich, den Relaisstrom abklingen, so daß am Relais eine Abschalt-Überspannung vermieden wird.

Bemessung für eine Speise-Gleichspannung von 24 V

Die Transistoren T_2 und T_3 können vom selben Typ sein. Hierbei müssen die höchstzulässigen Werte mindestens betragen: Collectorstrom 40 mA, Collector-Emitter-Spannung U_{CEO} 30 V, Verlustleistung 150 mW; T_1 ist ein Germanium-Phototransistor. Die Freilauf-Diode muß wenigstens 50 mA und 30 V aushalten. Widerstandswerte: $R_1 = 30\ k\Omega$, $R_2 = 22\ k\Omega$, $R_3 = 1{,}2\ k\Omega$, $R_4 = 2{,}7\ k\Omega$, $R_5 = 470\ \Omega$, $R_6 = 22\ \Omega$, Relais 600 Ω. Will man npn-Transistoren verwenden, so müssen die Speisespannung sowie die Freilauf-Diode umgepolt werden und der Widerstand R_1 entfallen.

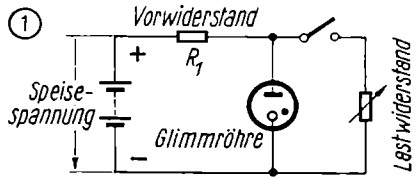
Wichtigstes über Phototransistoren

- Ein Phototransistor ist ein mit Lichteinwirkung steuerbarer Transistor.
- Bei Lichteinwirkung ergibt sich ein Collectorstrom, dessen Betrag mit steigender Lichteinwirkung zunimmt.
- Die Trägheit der Phototransistoren ist fast ebenso gering wie die der Photodioden.
- Phototransistoren haben weit höhere Lichtempfindlichkeiten (Ampere je Lux) als Photodioden oder Photoelemente.
- Man kann bei 1000 lx mit etwa 0,5 mA bis 3 mA rechnen.
- Phototransistoren verwendet man statt Photodioden wegen der höheren Empfindlichkeit, aber auch, um das Verhältnis des Hellstroms zum Dunkelstrom zu verbessern und um den Temperatureinfluß herabzusetzen.
- Germanium-Phototransistoren haben meistens die Zonenfolge pnp (siehe Bild 2) während Silizium-Phototransistoren meistens die Zonenfolge npn aufweisen.

Glimmröhren zum Stabilisieren von Gleichspannungen

Glimmröhre ohne Hilfsanode

Eine Glimmröhre hat eine Anode und eine kalte Katode sowie manchmal zusätzlich eine Hilfsanode.
Diese Elektroden befinden sich in einem Glaskolben, der mit Edelgas unter geringem Druck gefüllt ist. In dem Gas stehen freie Elektronen und positive Ionen als bewegliche Ladungsträger zur Verfügung. Diese Ladungsträger sind aber nicht so zahlreich, daß sie bereits bei niedriger Anoden-Katoden-Spannung einen nennenswerten Strom ermöglichen.
Um den Sperrzustand einer Glimmröhre ohne Hilfsanode zu überwinden, muß man der Anode gegen die Katode eine verhältnismäßig hohe (positive) Spannung geben. Aufgrund dieser Spannung werden die in der Gasfüllung enthaltenen freien Elektronen und Ionen so stark beschleunigt, daß es zu **Stoß-Ionisationen** kommt: Neutrale Atome werden in Ionen und Elektronen aufgespalten. Damit stehen dann genügend viele Ladungsträger für einen Stromübergang zwischen Anode und Katode zur Verfügung. Man drückt das aus, indem man sagt, die Röhre habe gezündet. Die relativ hohe Spannung, bei der das passiert, heißt **Zündspannung.** Die Bezeichnung **»Zünden«** rührt daher, daß der Stromdurchgang an einem in dem Röhrenkolben sichtbaren Glimmlicht erkennbar wird.
Würde man an der Glimmröhre eine Spannung vom Wert der Zündspannung belassen, so ergäbe sich ein sehr hoher Strom, der zu einem alsbaldigen Zerstören der Glimmröhre führen würde. Um das zu vermeiden, muß der Glimmröhre ein Widerstand vorgeschaltet sein, der den Strom auf einen für die Röhre unschädlichen Wert begrenzt. Zulässig sind Stromwerte innerhalb eines ziemlich großen Bereiches, in dem die Spannung der Anode gegen die Katode der Glimmröhre einen fast konstanten Wert aufweist. Diesen Spannungswert nennt man **Brennspannung.** Der Wert der Brennspannung liegt erheblich tiefer als der Wert der Zündspannung.
Aus der vorstehenden Schilderung folgt, daß man, um den Betriebszustand mit der Brennspannung zu erreichen, zunächst die mit der Zündspannung gegebene Hürde nehmen muß.
Wenn nun die Glimmröhre zum Stabilisieren einer Gleichspannung dienen soll, wird sie dem Lastwiderstand parallel geschaltet (**Bild 1**). Dabei darf dem Lastwiderstand, für den ja die Spannung stabilisiert werden soll, die Zündspannung nicht zugemutet werden. Aus diesem Grund erweist sich der in Bild 1 eingetragene Schalter als notwendig. Er darf erst geschlossen werden, wenn die Glimmröhre bereits gezündet ist.



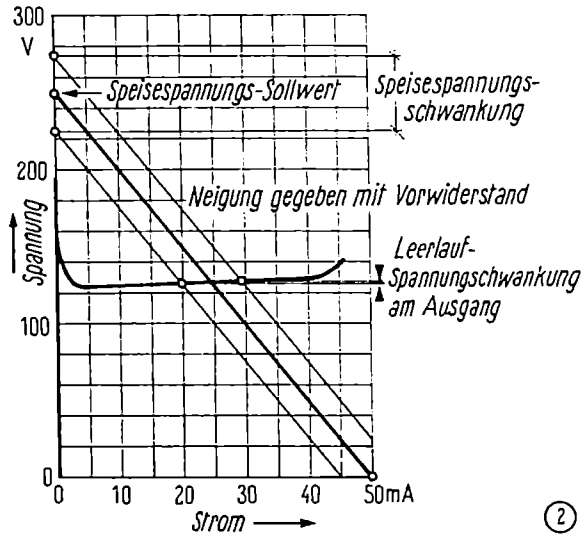
Schaltung zum Stabilisieren einer Gleichspannung auf den Wert der Brennspannung der Glimmröhre. Die Speiesespannung muß höher sein als die Zündspannung der Glimmröhre.

Glimmröhre mit Hilfsanode

Die Hilfsanode wird über einen eigenen Vorwiderstand an den Pluspol der Speisespannung angeschlossen. Ein Verbinden der Hilfsanode mit dem Lastwiderstand unterbleibt. Somit geht — verursacht von der Speisespannung — ein Strom über die Hilfsanode und deren Vorwiderstand.
Damit dieser Strom zustande kommt, muß natürlich auch hierfür die Zündspannung erreicht werden. Von dieser Zündspannung aber kann die Belastung unbeeinflußt bleiben.
Wenn die Glimmstrecke zwischen Katode und **Hilfsanode** gezündet ist, besteht zwischen diesen beiden Elektroden ein Glimmstrom. Die damit in dem Röhrenkolben vorhandenen Ladungsträger stehen der Strecke zwischen Katode und **Hauptanode** zur Verfügung. Diese Strecke braucht deshalb nicht auch noch gezündet zu werden. Statt mit einem Zünden hat man es hier nurmehr mit einer **Zünd-Übernahme** zu tun. Sie ergibt sich, wenn die Spannung der Hauptanode gegen die Katode ungefähr ihren Brennwert erreicht hat.
Mit dem Zufügen einer Hilfsanode gewinnt man noch einen zweiten Vorteil: Bei einer Röhre mit Hilfsanode reicht der ausnutzbare Glimmstrom-Bereich weiter hinunter als bei einer Röhre ohne Hilfsanode. (Der ausnutzbare Glimmstrombereich wird nicht selten **Regelbereich** genannt).

Stabilisieren mit Glimmröhre ohne Hilfsanode

Dazu gehören die mit Bild 1 veranschaulichte Schaltung sowie die Kennlinienbilder 2 und 3. Zunächst wollen wir **Bild 2** studieren. Es betrifft den Fall, der mit Bild 1 für offenen Schalter gegeben ist.
Der Speisespannungs-Sollwert beträgt 250 V. Die Speisespannung kann etwa zwischen 225 V und 275 V schwanken. Der Vorwiderstand weist einen Widerstandswert von 250 V : (50 mA) = 50 kΩ auf. Hierzu gehören die drei von links oben nach rechts unten einander parallel verlaufenden Geraden. Diese Geraden zeigen, wie für die drei Speisespannungswerte 225 V, 250 V und 275 V die der Glimmröhre zur Verfügung gestellte Spannung von dem Strom abhängt, der von dieser Spannung verursacht wird.



Die Glimmröhren-Kennlinie von Null aus bis zur Zündspannung (hier etwa 295 V) schroff ansteigend, dann erst steil und anschließend schwächer abfallend, um weiterhin leicht anzusteigen, außerdem drei Widerstandsgerade für einen Vorwiderstand von 250 V : (50 mA) = 5 kΩ und die Speisespannungswerte 225 V, 250 V sowie 275 V.

Außer den drei Geraden enthält das Bild 2 noch die Spannungs-Strom-Kennlinie der Glimmröhre. Wir erkennen, daß deren Zündspannung ungefähr 295 V beträgt, daß bei rund 5 mA der Tiefstwert der Brennspannung (die **Löschspannung**) mit 124 V erreicht ist und daß die Brennspannung mit zunehmendem Glimmstrom bis zu einem Glimmstromwert von 40 mA einigermaßen gleichmäßig (schwach) ansteigt um für 40 mA auf näherungsweise 130 V zu kommen.

Bei offenem Schalter in der Schaltung nach Bild 1 fließt nur der Glimmstrom.

Die über den Vorwiderstand mittels der Speisespannung der Glimmröhre zur Verfügung gestellte Spannung ist natürlich in diesem Fall die Anoden-Katoden-Spannung der Glimmröhre.

Dabei stellt der Glimmröhrenstrom den einzigen Strom dar, der jeweils auch den Vorwiderstand durchfließt. Das bedeutet: Es kann sich immer nur derjenige Betriebszustand einstellen, bei dem die Glimmröhrenspannung mit der über den Vorwiderstand zur Verfügung gestellten Spannung und der Glimmröhrenstrom mit dem den Vorwiderstand durchfließenden Strom übereinstimmen. Diese Übereinstimmung besteht im Kennlinienbild (2) nur für den Schnittpunkt der Glimmröhrenkennlinie mit der jeweils in Betracht kommenden Geraden, die mit Speisespannung und Vorwiderstand festgelegt ist. In das Bild 2 sind zwei solche Schnittpunkte eingetragen, nämlich einer für das Speise-Spannungs-Maximum und einer für das Speisespannungs-Minimum. In Bild 2 kann man an den beiden Schnittpunkten ablesen, daß bei einem Schwanken der Speisespannung von 225 V bis auf 275 V, d. h. um 50 V, die

Anoden-Katoden-Spannung der Glimmröhre nur um etwa 2 V schwankt.

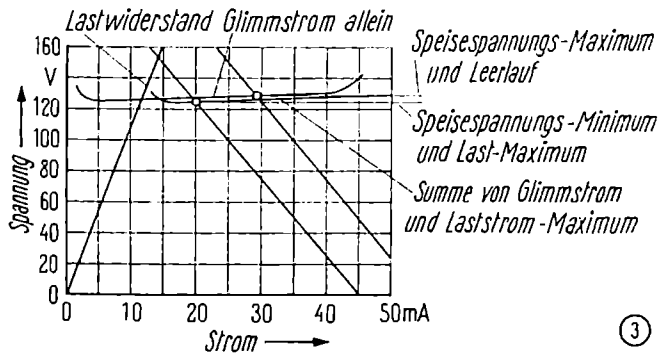
Nun werde der Schalter geschlossen. Zum geschlossenen Schalter gehört **Bild 3.** Es enthält die unteren Abschnitte der beiden äußeren der drei schrägen Geraden des Bildes 2 und von der Glimmspannungs-Glimmstrom-Kennlinie dieses Bildes lediglich den hier interessierenden Abschnitt (Glimmstrom allein). Außerdem sind in Bild 3 eingetragen:

- die Spannungs-Strom-Kennlinie des ohmschen Lastwiderstandes von 110 V : (10 mA) = 11 kΩ und
- die Spannungs-Strom-Kennlinie der Parallelschaltung der Glimmröhre mit dem Lastwiderstand (Summe der beiden jeweils zur selben Spannung gehörenden Ströme.)

Aus Bild 3 ist zu entnehmen, daß die Spannung an der Glimmröhre und damit am Lastwiderstand hier maximal von 124 V bis 129 V, d. h. um 5 V schwanken kann.

Schaltung mit Glimmröhre, die eine Hilfsanode hat

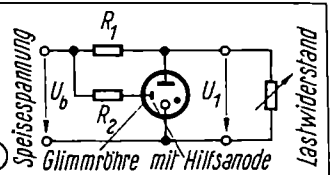
Bild 4 zeigt eine Stabilisierungsschaltung mit einer solchen Glimmröhre. Den über die Hilfsanode fließenden Hilfsstrom bemißt man mit Hilfe des Begrenzungswiderstandes R_2 auf etwa 100 bis 200 μA. Mit einem höheren Hilfsstrom bekäme man bei geringen Hauptanodenströmen zwischen Hauptanode und Katode zu niedrige Spannungen.



③

Dieses Bild bringt zunächst einmal einen Ausschnitt aus Bild 2 mit dem hier interessierenden schwach ansteigenden Abschnitt der Glimmröhren-Kennlinie und den Widerstandsgeraden für 5 kΩ sowie für 225 V und 275 V. Zusätzlich sind hier eingetragen: die Lastwiderstands-Kennlinie [110 V : (10 mA) = 11 kΩ] sowie ein Stück der Kennlinie, die den Zusammenhang der Spannung an der Parallelschaltung von Glimmröhre und Lastwiderstand mit dem diese Parallelschaltung durchfließenden Gesamtstrom darstellt. Miteinander zu vergleichen sind die Werte der Spannung — einmal an der Glimmröhre allein bei 275 V Speisespannung, nämlich 129 V, und einmal an der Parallelschaltung der Glimmröhre mit der Last, bei 225 V, wofür 124 V gelten.

Schaltung zum Stabilisieren einer Gleichspannung auf den Wert der Brennspannung einer Glimmröhre mit Hilfsanode.



④

Kennlinienbilder zur Schaltung nach Bild 4

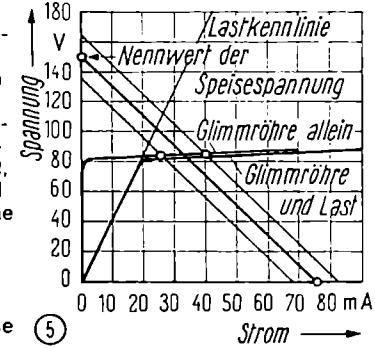
Die für die in Bild 4 gezeigte Schaltung geltenden Zusammenhänge werden mit **Bild 5** verdeutlicht. Angenommen sind dazu:

- ein Nennwert der Speisespannung von 150 V,
- mögliche Schwankungen der Speisespannung zwischen 135 V und 165 V,
- ein Vorwiderstand R_1 von 150 V : (75 mA) = 2 kΩ,
- die dort eingetragene Glimmröhren-Kennlinie und
- eine maximale Belastung mit einem Last-Widerstand von 180 V : (42 mA) ≈ 4,3 kΩ.

Markiert sind in Bild 5 noch die Punkte, die die Zustände der Schaltung bei fehlender Belastung und maximalen bzw. minimalen Wert der Speisespannung betreffen. Man sieht, daß die Anoden-Katoden-Spannung der Glimmröhre innerhalb eines Speisespannungsbereiches zwischen 135 V und 165 V nur um rund 1 V schwankt.

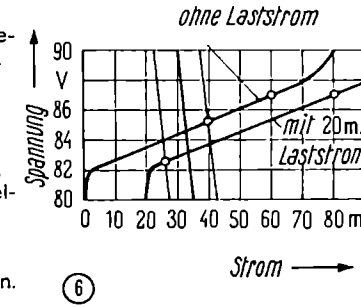
In **Bild 6** ist der hier interessierende Teil des Bildes 5 mit verzehnfachtem Spannungsmaßstab herausgezeich-

Dieses Bild zeigt — entsprechend den Bildern 2 und 3 — die Verhältnisse, die sich beim Betrieb einer Glimmröhre mit Hilfsanode für einen Vorwiderstand von 2 kΩ, einen Lastwiderstand von 4,3 kΩ sowie eine zwischen 135 V und 165 V schwankende Speisespannung ergeben. Insbesondere werden verglichen: die Spannung an der Glimmröhre allein bei 165 V und die Spannung an der Parallelschaltung der Glimmröhre mit der Last bei 135 V.



⑤

Hier handelt es sich um einen Ausschnitt aus dem Bild 5, dargestellt mit einem stark vergrößerten Spannungsmaßstab. Das ermöglicht es, die Spannungen, auf die es ankommt, deutlich zu erkennen. Die beiden kleinen Kreise rechts sollen den höchstzulässigen Glimmstrom andeuten.



⑥

net. Der der Lastkennlinie von Bild 5 entsprechende Laststrom wurde in Bild 6 mit 20 mA berücksichtigt.
Aus Bild 6 folgt, daß die höchste Spannung, die bei fehlendem Laststrom und maximalem Speisespannungswert zwischen Anode und Katode auftritt, rund 85 V beträgt, während als Mindestspannung bei minimaler Speisespannung und einem Laststrom von 20 mA etwa 82,5 V auftreten.

Glimmröhren zum Stabilisieren

Zum Stabilisieren von Gleichspannungen braucht man von den Glimmröhren die Glimmstrecke zwischen Anode und Katode. Eine solche Glimmstrecke steht bereits in einem Glimmlämpchen zur Verfügung, das keinen eingebauten Vorwiderstand enthält. Ein solches Lämpchen kann man mit beliebiger Polung verwenden. Besser geeignet zum Stabilisieren sind Glimmröhren, die man auch Glimm-Dioden nennt, weil bei ihnen Katode und Anode unterschieden werden. Speziell zum Stabilisieren von Gleichspannungen gibt es Stabilisator-Röhren mit größerer Konstanz der Brennspannung. Die diesbezügliche Elite stellen die **Referenzspannungsröhren** dar, die auch **Präzisions-Spannungs-Stabilisatorröhren** oder **Vergleichsspannungsröhren** genannt werden. Die höchstzulässigen Stromwerte sind für diese Röhren allerdings meistens geringer als die für die anderen Stabillsatorröhren.

Wichtigstes über Glimmröhren zum Stabilisieren von Gleichspannungen

- Eine Glimmstrecke, wie sie in einer stromdurchflossenen Glimmröhre zwischen deren Anode und Katode besteht, weist innerhalb eines größeren Strombereiches eine fast konstante Spannung auf.
- Diese betriebsmäßig verwertete »Brennspannung« steigt mit Erhöhen des Stromes etwas an (innerhalb des ausnutzbaren Strombereiches, des »Regelbereiches«, um etwa von 0,5 V bis 10 V).
- Um zu vermeiden, daß an der Hauptstrecke einer Glimmröhre d. h. zwischen deren Anode und deren Katode die Zündspannung auftreten muß, rüstet man manche Glimmröhrentypen mit Hilfsanoden aus.
- Die Hilfsanode wird über einen besonderen Widerstand an den Pluspol der Speisespannung gelegt.
- Der Wert der Speisespannung muß stets höher sein als der Zündwert der Hilfsanoden-Katoden-Spannung, damit ein Hilfsanodenstrom zustandekommen kann.
- Der zwischen Katode und Hilfsanode fließende Glimmstrom stellt innerhalb der Glimmröhre einen Ladungsträgervorrat dar, der der Hauptstrecke der Röhre zur Verfügung steht.
- Folglich kann ein Glimmstrom zwischen Katode und Hauptanode schon bei Erreichen der hierzu gehörenden Brennspannung zu fließen beginnen, ohne daß diese Strecke selbst »gezündet« werden muß.

Silizium-npn-Transistor in Inverter

Der Transistor

Ein Silizium-npn-Transistor befindet sich im Durchlaßzustand, wenn seine Collector-Emitter-Spannung und seine Basis-Emitter-Spannung positive Werte haben, wobei die Basis-Emitter-Spannung höher sein muß als die Schleusenspannung der Basis-Emitter-Diode des Transistors (bei 25 °C über etwa 0,7 V). Mit etwa 0,8 V ist der Transistor bei dieser Temperatur bereits durchgeschaltet. Dabei beträgt seine Collector-Emitter-Restspannung kaum mehr als 0,2 V. Sein Collector-Basis-Gleichstrom-Verhältnis ist beträchtlich abgesunken und sinkt weiter ab, wenn die Basis-Emitter-Spannung noch etwas über 0,8 V erhöht wird.
Man beachte, daß der Wechsel zwischen Sperr- und Durchschaltzustand des Silizium-Transistors bei einer Temperatur von 25 °C mit dem geringen Erhöhen der Basis-Emitter-Spannung von 0,7 V auf nur 0,8 V erreicht wird!
Die Temperatur beeinflußt zwar die Werte der Schleusenspannung und der Durchschaltspannung, wirkt sich aber auf den Unterschied zwischen diesen Spannungen weniger aus.

Der Inverter

Ein Inverter ist eine Schaltung, in der ein Erhöhen der Eingangsspannung ein Absinken der Ausgangsspannung bewirkt.
Die Bezeichnung »Inverter« verwendet man vorzugsweise im Zusammenhang mit Binär-Verknüpfungsschaltungen (auch Logikschaltungen genannt). In diesen Schaltungen kommen, wie mit **»binär«** angedeutet, nur zwei Signalspannungswerte in Betracht: ein algebraisch niedriger Wert U_L und ein algebraisch höherer Wert U_H.
Hier soll U_L eine Spannung sein, deren Wert höchstens 0,3 V beträgt, während U_H nicht viel tiefer liegen möge als der Wert der Speisespannung mit wenigstens etwa 1,4 V.
Mit den beiden Spannungspegeln U_L (niedriger Wert) und U_H kann man die Funktion des Inverters in Binärschaltungen so beschreiben:

U_L am Eingang gibt U_H am Ausgang
U_H am Eingang gibt U_L am Ausgang

Dieses Vertauschen der zwei Signalspannungswerte bezeichnet man als **Inversion.** (Die dementsprechende Binär-Verknüpfung wird in der Logik-Algebra **Negation** genannt). Das sowohl für den Inverter im Rahmen einer Blockschaltung wie auch in der Logik-Algebra für die Negation geltende Symbol zeigt **Bild 1.**

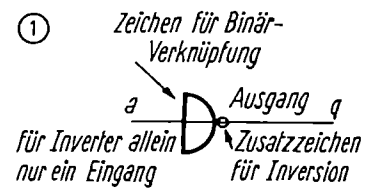
Die Inverterschaltung

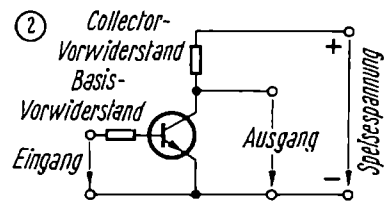
Diese Schaltung, die man auch **NICHT-Schaltung** nennt, besteht aus einem npn-Transistor und seinem Collector-Vorwiderstand. Die Eingangsspannung wird (oft über einen Widerstand) an die Basis gegen den Emitter gegeben. Die Ausgangsspannung nimmt man am Collector gegen den Emitter ab. (**Bild 2**).
Solange die Eingangsspannung ihren Wert U_L hat (weniger als 0, 7 V), ist der Transistor gesperrt. Dabei tritt am (unbelasteten) Ausgang die Speisespannung als U_{II} auf.
Gibt man an den Eingang, in den ein Basis-Vorwiderstand als Schutz gegen zu hohen Basisstrom eingefügt ist, die Spannung U_{II}, so wird damit der Transistor durchgeschaltet, wobei die Ausgangsspannung auf die Collector-Emitter-Restspannung von wenigen Zehnteln Volt zurückgeht.

Logiktafel der Inversion (der Negation)

In der Logiktafel handelt es sich nur um die Beziehungen zwischen der Eingabe und dem Verknüpfungsergebnis — ohne jegliche Rücksicht auf Spannungen in irgend einer Schaltung, mit der die Verknüpfung realisiert wird. Deshalb enthält eine Logiktafel nur die Logikzahlen 0 und 1. **Bild 3** zeigt die Logiktafel der Inversion. Eingegeben wird die allgemeine Logikzahl *a*, die im

Symbol für die Inversion, die im Zusammenhang mit den Verknüpfungen an sich Negation genannt wird.





Inverterschaltung, bestehend aus einem Transistor mit Collector- und Basis-Vorwiderstand. Zu dem Charakter der Inverterschaltung gehört, daß der Transistor nur entweder gesperrt oder durchgeschaltet ist.

Diese Tafel zeigt, daß beim Inverter zur Eingangs-Logikzahl $a = 1$ die Ausgangs-Logikzahl $q = 0$ und umgekehrt zu $a = 0$ $q = 1$ gehören.

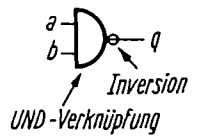
③ Logiktafel für Inversion

a	q
0	1
1	0

Symbol für ④ NOR-Verknüpfung

Das NOR-Symbol ist das ODER-Symbol mit einem die Negation andeutenden kleinen Kreis oder dicken Punkt an der Ausgangsseite des Symbols.

Symbol für ⑤ NAND-Verknüpfung

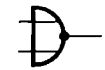


Das NAND-Symbol ist das UND-Symbol mit einem die Negation bedeutenden kleinen Kreis oder dicken Punkt an der Ausgangsseite des Symbols.

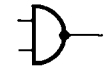
speziellen Fall 0 oder 1 ist. Ausgegeben wird die allgemeine Logikzahl *q*, die hier als »nicht *a*« gekennzeichnet werden kann.

An ODER- bzw. UND-Schaltung angehängter Inverter

Inverter werden meistens an ODER- bzw. UND-Verknüpfungsschaltungen angehängt. Die **Bilder 4** und **5** zeigen die dafür geltenden Verknüpfungssymbole. Die Inversion wird hierin mit einem kleinen Kreis oder mit einem entsprechend dicken Punkt an der Mitte der Ausgangsseite des Symbols kenntlich gemacht.



NOR-Symbol



NAND-Symbol ⑥

Früher hat man anstelle des angefügten kleinen Kreises oder Punktes als Zeichen der Negation einen Punkt in den Rand des Symbolzeichens eingetragen.

NAND-Logiktafel = NAND-Verknüpfungstafel

⑦

a	b	c	q
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1

Diese Tafel zeigt, daß die Ausgangs-Logikzahl den Wert Null nur annimmt, wenn für jede der Eingangs-Logikzahlen der Wert 1 gilt.

NOR-Logiktafel = NOR-Verknüpfungstafel

⑧

a	b	c	q
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0

Hieraus erkennt man, daß die Ausgangs-Logikzahl nur dann gleich 1 ist, wenn alle Eingangs-Logikzahlen gemeinsam den Wert Null aufweisen.

Manchmal setzt man diesen Punkt noch statt **an** das Symbol **in** die dem Ausgang zugeordnete Linie (**Bild 6**). Eine ODER-Verknüpfung mit anschließender Inversion nennt man **NOR-Verknüpfung** nach den englischen Wörtern **not or.** Dementsprechend kommt die Bezeichnung **NAND-Verknüpfung** für eine UND-Verknüpfung mit darauf folgender Inversion von **not and.**

NAND- und NOR-Logiktafeln

Bild 7 enthält die Logiktafel für die NAND-Verknüpfung dreier Eingangs-Logikzahlen *a*, *b* und *c* mit der das Verknüpfungs-Ergebnis darstellenden Ausgangs-Logikzahl *q*. **Bild 8** gehört zur NOR-Verknüpfung ebenfalls dreier Eingangs-Logikzahlen.
In den **Bildern 9** und **10** sind diese Logiktafeln weitgehend vereinfacht.

NAND-Logiktafel

⑨

a	*b*	*c*	*q*
0	0	0	1
alle anderen Kombinationen			0

Zulässige Vereinfachung der in Bild 7 enthaltenen Logiktafel.

NOR-Logiktafel

⑩

a	*b*	*c*	*q*
1	1	1	0
alle anderen Kombinationen			1

Möglichkeit, die in Bild 8 dargestellte Logiktafel zu vereinfachen.

NAND- und NOR-Pegeltafeln (Arbeitstafeln)

Aus den Logiktafeln folgen die Pegeltafeln. Dabei kann der Logik-Eins der Signalspannungspegel U_H oder der Signalspannungspegel U_L zugeordnet werden. Hierbei gehört zur Logik-Null der Signalspannungspegel U_L bzw. U_H. Das bedeutet:
Aus der NAND-Logiktafel folgen die *H*-NAND und *L*-NOR-Pegeltafel ebenso wie aus der NOR-Logiktafel die *H*-Nor- und *L*-NAND-Pegeltafel. Dabei stimmen völlig überein:
die *H*-NAND-Pegeltafel mit der *L*-NOR-Pegeltafel (**Bild 11**) und die *H*-NOR-Pegeltafel mit der *L*-NAND-Pegeltafel (**Bild 12**).
Von der Möglichkeit, mit dem Wechsel zwischen *H*-Zuordnung und *L*-Zuordnung dieselbe Schaltung wahlweise als NOR-Glied oder als NAND-Glied verwenden zu können, wird in Schaltungen für Binär-Verknüpfungen viel Gebrauch gemacht.

H-NAND/L-NOR-Pegeltafel

⑪

A	B	C	Q
L	L	L	H
L	L	H	H
L	H	L	H
L	H	H	H
H	H	L	H
H	H	H	L
H	L	L	H
H	L	H	H

A	B	C	Q
H	H	H	L
alle anderen Kombinationen			H

Pegeltafel, die zeigt, daß eine NAND-Schaltung bei *H*-Zuordnung dieselben Logik-Verknüpfungen betrifft wie eine NOR-Schaltung bei *L*-Zuordnung. Darunter ist die dem Bild 9 gemäß vereinfachte Pegeltafel eingetragen.

H-NOR/L-NAND-Pegeltafel

⑫

A	B	C	Q
L	L	L	H
L	L	H	L
L	H	L	L
L	H	H	L
H	H	L	L
H	H	H	L
H	L	L	L
H	L	H	L

A	B	C	Q
L	L	L	H
alle anderen Kombinationen			L

Aus dieser Pegeltafel kann man ersehen, daß die NOR-Schaltung bei *H*-Zuordnung bezüglich der Logik-Verknüpfungen mit der NAND-Schaltung bei *L*-Zuordnung übereinstimmt. Unten die Vereinfachung.

Wichtigstes über Transistoren als Inverter

- Bei 25 °C verbleibt ein Silizium-npn-Transistor gesperrt, solange seine Basis-Emitter-Spannung etwa 0,7 V noch nicht übersteigt. Dabei tritt zwischen Collector und Emitter gegebenenfalls die volle Speisespannung auf.
- Bei 25 °C ist ein Silizium-npn-Transistor durchgeschaltet, wenn seine Basis-Emitter-Spannung ungefähr 0,8 V erreicht hat.
- Im Durchschaltzustand ist das Collector-Basis-Stromverhältnis bereits auf einen ziemlich geringen Wert abgesunken.
- Im Durchschaltzustand ist die dafür geltende Collector-Emitter-Restspannung mit kaum mehr als 0,2 V gegeben.
- Ein Inverter ist eine binär betriebene Schaltung an deren Ausgang sich jeweils der dem Eingang entgegengesetzte Signalpegel einstellt.
- Für die beiden Signalpegel hat man im Zusammenhang mit Binärschaltungen meistens die Formelzeichen U_H (höherer Wert) und U_L (niedriger Wert).
- Statt U_H und U_L schreibt man der Kürze halber oft auch nur *H* und *L* (*H* von High und *L* von Lov).
- Inverter werden vielfach an *H*-ODER- bzw. *H*-UND-Verknüpfungsschaltungen angehängt. Daraus folgen die *H*-NOR/*L*-NAND-Schaltung und die *H*-NAND/*L*-NOR-Schaltung.

Kondensator an Wechselstromquelle

Wechselstrom und Kondensator

Ein Kondensator besteht aus zwei leitenden Teilen (zwei **Belägen**), die sich — voneinander isoliert — mit großen Flächen in geringem Abstand gegenüberstehen. Wegen der zwischengefügten Isolation ist ein Kondensator für einen Gleichstrom eine Sperre.

Ein Kondensator kann aber aufgeladen, entladen, entgegengesetzt aufgeladen (umgeladen) und dann wieder entladen werden. Es ist möglich dieses Laden, Entladen, Umladen, Entladen, Umladen, Entladen periodisch vor sich gehen zu lassen. Bei einem solchen periodischen Vorgang kommt es zu einem zeitlich periodisch verlaufenden Kondensator-Wechselstrom. Demgemäß ist es möglich, einen Wechselstrom über einen Kondensator zu übertragen.

Stellt man sich das periodische Laden, Entladen, Umladen usw. vor, so erkennt man, daß ein Übertragen von Wechselstrom über einen Kondensator umso leichter zu erreichen ist, je größer man die Kondensator-Kapazität wählt und je höher die Frequenz des zu übertragenden Wechselstromes ist.

»Leichter zu erreichen« heißt hier »mit weniger Spannung am Kondensator auskommen«. Bis jetzt wurde die Spannung, die sich jeweils mit dem Aufladen des Kondensators ergibt, noch nicht erwähnt.

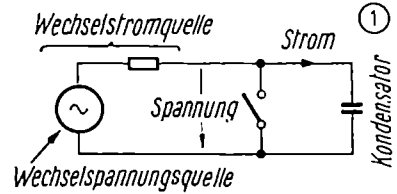
Wir wollen uns zunächst daran erinnern, daß die Spannung an einem Kondensator zum Abschluß einer Aufladung am höchsten sein muß und daß der Betrag dieser Spannung umso größer ausfällt,

- je höher der Betrag des Kondensator-Ladestromes ist,
- je länger der Kondensator jeweils aufgeladen wird und
- je weniger Kapazität der Kondensator hat.

Die ersten beiden Zusammenhänge sieht man sofort ein. Daß die Kondensatorspannung bei demselben Betrag der in den Kondensator hineingeladenen Amperesekunden umso höher ausfällt, je kleiner die Kapazität ist, erkennt man vielleicht weniger rasch. Dieser Zusammenhang läßt sich aber auch anders formulieren, nämlich so: Um eine bestimmte Kondensatorladung (gemessen in Amperesekunden) zu erreichen, braucht man eine umso höhere Spannung, je kleiner die Kapazität des Kondensators ist. Damit versteht man auch den dritten Punkt.

Die zugrunde gelegte Schaltung

Bild 1 zeigt die höchst einfache Schaltung. Die Quelle



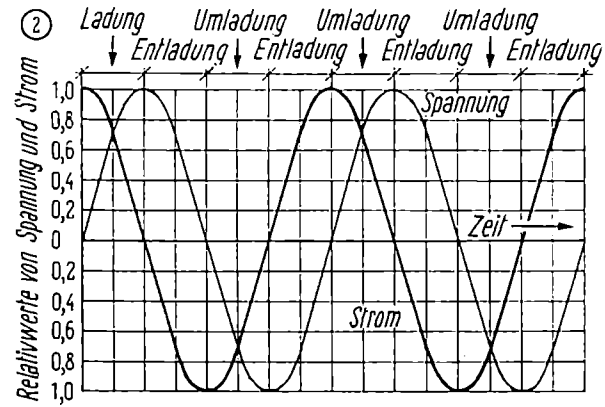
Wechselstromkreis mit Wechselspannungsquelle und hohem Widerstand, mit dem bei geöffnetem Schalter ein Kondensator in Reihe liegt.

ist hierin als Wechsel**strom**quelle bezeichnet. Sie stellt, wenn man das wörtlich nimmt, von sich aus primär keine Spannung zur Verfügung, sondern liefert den Wechselstrom so, wie sein zeitlicher Sinus-Verlauf in **Bild 2** dargestellt ist.

Eine solche Stromquelle kann man übrigens in gewissen Grenzen durchaus verwirklichen: Man braucht dazu eine Spannungsquelle mit sehr hoher Wechselspannung und einen in Reihe mit dieser Spannungsquelle geschalteten hohen Widerstand. Die damit gegebene Reihenschaltung wirkt für alle Belastungen mit Stromzweigen, an denen nur kleine Bruchteile der Gesamtspannung auftreten, als **Strom**quelle:

Wegen der dabei vernachlässigbaren Belastungs-Klemmenspannung ist der Strom von dieser Spannung nahezu unabhängig.

Im vorliegenden Fall heißt das: Die Wechselstromquelle hat eine so hohe Urspannung, daß die am Kondensator beim Übertragen des Wechselstromes auftretende Spannung hiergegen vernachlässigbar ist und einen Ausgangswiderstand der im Verein mit der Urspannung der Quelle deren Strom bestimmt. Die Stromquelle arbeitet dabei gewissermaßen nahezu im Kurzschluß (Klemmenspannung gegen Urspannung vernachlässigbar).



Eine Wechselspannung und der von ihr bewirkte Kondensatorstrom. Dieser Wechselstrom eilt der Wechselspannung um ein Viertel einer Periode voraus (Phasenverschiebung 90 ° voreilend). Abhängig von der Zeit sind die Relativwerte der Spannung und des Stromes aufgetragen: Jeder Augenblickswert ist durch den hierzu gehörenden Scheitelwert geteilt. Somit ergibt sich für die Scheitelwerte der Spannung sowie des Stromes die Zahl 1.

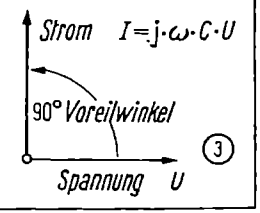
Studium des Bildes 2

Der im Bild 1 eingetragene Schalter S werde in dem Zeitpunkt geöffnet, in dem der Sinus-Wechselstrom seinen Scheitelwert durchläuft. Die Kondensatorspannung ist beim Öffnen des Schalters gleich Null, weil der Schalter den Kondensator bis dahin überbrückt hatte.
Mit dem Strom wird der Kondensator aufgeladen. Das geschieht dem abnehmenden Strom-Augenblickswert gemäß immer langsamer, bis beim Nulldurchgang des Strom-Augenblickswertes der Scheitelwert der Spannung erreicht ist. Der nun in entgegengesetzter Richtung fließende Strom entlädt den Kondensator und zwar — dem Strom-Augenblickswert entsprechend — erst langsam und dann rascher. Nach einem Viertel einer Periode und deshalb in dem Zeitpunkt, in dem der Strom seinen Scheitelwert durchläuft, ist der Kondensator entladen. Nun beginnt das entgegengesetzte Aufladen mit dem weiter in derselben Richtung fließenden Strom. So geht es fort.
Die Kondensatorspannung nimmt bei gleichen Stromwerten umso geringere Werte an, je größer die Kapazität des Kondensators und je höher die Frequenz des Stromes sind. Mit anderen Worten: Der kapazitive Wechselstrom-Widerstand eines Kondensators ist der Kondensator-Kapazität und der jeweiligen Frequenz umgekehrt proportional.
Bild 2 zeigt ferner: Der zeitliche Stromverlauf **eilt** dem zeitlichen Spannungsverlauf um ein Viertel einer Periode **voraus:** Strom-Scheitelwert zum Anfangszeitpunkt, Spannungs-Scheitelwert ein Viertel einer Periode später.

Zeigerdarstellung

Bild 3 veranschaulicht das, was Bild 2 darstellt, in besonders einfacher und übersichtlicher, wenn auch abstrakter Form.
Es zeigt den Zusammenhang zwischen dem Sinus-Wechselstrom der über einen Kondensator übertragen wird, mit der Sinus-Wechselspannung, die dabei am Kondensator auftritt, unter Zuhilfenahme eines Stromzeigers und eines Spannungszeigers.
Den Zeiger-Umlauf denkt man sich hier entgegen dem Uhrzeigersinn. Daher ist der Stromzeiger hier gegen den Spannungszeiger um 90° vorverdreht.

Dieses kleine, einfache Bildchen veranschaulicht genau das, was Bild 2 zeigt, nämlich den Sinusstrom, die Sinusspannung und das Voreilen des Stromes gegen die Spannung um ein Viertel einer Periode.



Kapazitiver Leit- und Widerstandswert

Wir haben erkannt: Zu einem über einen Kondensator übertragenen Wechselstrom gehört am Kondensator eine Wechselspannung. Der Wechselstrom hat einen umso höheren Betrag, je höher der Betrag der Wechselspannung ist. Das versteht sich von selbst.
Außerdem fällt der Betrag des Wechselstromes aber auch, wie ebenfalls bereits angedeutet, umso größer aus, je höher bei gegebenem Betrag der Wechselspannung die Kapazität und die Frequenz gewählt werden.
Das bedeutet: Der **(kapazitive) Leitwert** eines Kondensators ist dem Produkt aus der Kapazität C und der Frequenz f proportional. Dazu kommt (warum — das soll uns hier nicht kümmern) als Faktor das doppelte der Zahl π (kleiner griechischer Buchstabe, der **Pi** genannt wird und hier rund 3,14 bedeutet). Der Betrag des kapazitiven Leitwertes B_C ist demgemäß gegeben mit

$$B_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$$

Darin gelten als Einheiten für die Frequenz f das Hertz oder, was dasselbe bedeutet, 1 : s und für die Kapazität C das Farad oder wieder bei derselben Bedeutung A · s : V. Somit ergibt sich, wie das sein muß, für B_C die Einheit A : V oder Siemens (S).
Das Produkt $2 \cdot \pi \cdot f$ kommt in manchen Zweigen der Elektronik und auch in der Leistungs-Elektrotechnik sehr häufig vor. Deshalb hat man dafür die Abkürzung ω (kleiner griechischer Buchstabe Omega) eingeführt, also

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Man bezeichnet ω als **Kreisfrequenz.** Die Kreisfrequenz ist das 2π-fache der Frequenz. Man beachte: Während man den Begriff »Frequenz« auch verwendet, wenn es sich beim zeitlich periodischen Verlauf nicht um einen Sinusverlauf handelt, gilt die Kreisfrequenz immer nur für Sinusverlauf!
Der Betrag des kapazitiven Leitwertes, nämlich B_C, ist für zeitlichen Sinusverlauf des Stromes I und damit auch der Spannung U — genau entsprechend dem Gleichstromleitwert — gegeben mit $B_C = \frac{|I|}{|U|}$
Allerdings sind hier die Formelzeichen I für den Strom und U für die Spannung zwischen senkrechte Striche (zwischen zwei **Betragstriche**) gesetzt. Damit wird angedeutet, daß es sich um die Beträge handeln soll. Dies bedeutet im Zusammenhang mit Wechselgrößen, daß die Phasenverschiebung (die gegenseitige **Phasenlage**) außer acht bleibt. Für die gegenseitige Phasenlage (die **Phasenverschiebung**) zwischen Spannung und zu ihr gehörendem Strom hat man das Formelzeichen φ (kleiner griechischer Buchstabe **Phi**).
Ob man in der Formel für B_C für I und U (gemeinsam) die Scheitel- oder Effektivwerte einsetzt, ist hierbei belanglos: Die Effektivwerte betragen bei dem hier vorausgesetzten Sinusverlauf rund das 0,707fache der

Scheitelwerte. Natürlich darf man nicht etwa für den Strom den Scheitelwert und dazu für die Spannung den Effektivwert oder für die Spannung den Scheitelwert und für den Strom den Effektivwert einsetzen.

Achtung: Was in diesem Kapitel — natürlich außer dem Wichtigsten — nun noch folgt, braucht nur derjenige jetzt durchzustudieren, der sich dafür näher interessiert. Man kommt bis zu einem gewissen Grade ganz gut ohne Kenntnis dessen aus, was die nachstehenden Abschnitte enthalten.

Immerhin — wer jetzt oder später weiter in die Gebiete der Elektronik eindringen möchte, in denen es sich um Sinus-Wechselspannungen und Sinus-Wechselströme dreht, wird kaum darum herumkommen, die mit diesen Abschnitten gegebenen Erklärungen zur Kenntnis zu nehmen.

Nochmals der kapazitive Leitwert

Da für den Betrag B_C des kapazitiven Leitwertes der bereits erwähnte Zusammenhang gilt:

$$B_C = \frac{|I|}{|U|} = \omega \cdot C$$

kann man daraus sofort für den Betrag X_C des kapazitiven Widerstandes ableiten:

$$X_C = \frac{|U|}{|I|} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Vorstehend wurde stets der Ausdruck »Betrag« verwendet. Das hat seinen Grund: Man erwartet eigentlich, daß man z. B. den Leitwert herausbekommt, wenn man den Stromwert durch den Spannungswert teilt. Nun gehört aber zum Wert eines Wechselstromes genau genommen nicht sein Betrag allein sondern auch seine Phasenlage gegenüber der ihm zugeordneten Spannung. Betrachtet man I und U als die Formelzeichen der Werte des Stromes und der Spannung mit der hierzugehörenden Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, so darf man beim kapazitiven Leitwert die gegenseitige Phasenverschiebung (hier mit 90° Stromvoreilen gegeben) nicht beiseite lassen. Dafür hat man das kleine **Jot**, d. h. das Zeichen j, gewählt. Fügt man dieses Zeichen als Faktor zu dem Formelzeichen oder Ausdruck einer Sinus-Wechselgröße zu, so bedeutet dies das Vorverschieben um ein Viertel einer Periode, d. h. um 90°. Man sehe sich Bild 3 daraufhin nochmals an. Mit dem j gilt:

$$I = \mathrm{j} \cdot \omega \cdot C \cdot U = \mathrm{j} \cdot B_C \cdot U$$

Der kapazitive Widerstand

Seinen Betrag haben wir im vorhergehenden Abschnitt bereits als X_C kennengelernt. Für seinen Wert (in dem die gegenseitige Phasenverschiebung mit berücksichtigt ist) gilt:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\mathrm{j} \cdot B_C} = \frac{1}{\mathrm{j} \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{\mathrm{j}} \cdot X_C$$

Nun ist aber (mathematisch begründet):

$$\frac{1}{j} = -j$$

Hiermit gilt für den kapazitiven Widerstand auch

$$\frac{U}{I} = -j \cdot X_C = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Dazu gehört:

$$U = -j \cdot X_C \cdot I$$

Dies heißt $I \cdot X_C$ gibt den Betrag von U. Die Spannung U eilt dabei dem Strom I um 90° nach. Wenn nämlich j das Voreilen um 90° kennzeichnet, muß der Faktor —j das Nacheilen um 90° bedeuten.

Wirk und Blind

In einem ohmschen Widerstand wird elektrische Leistung umgesetzt. Sie verwandelt sich darin in Wärmeleistung. Im ohmschen Widerstand bewirkt die elektrische Leistung somit etwas und geht deshalb als solche verloren.

In einem kapazitiven Widerstand findet ein solcher Leistungsumsatz nicht statt: Der Kondensator wird wechselweise aufgeladen und entladen. Das was er beim Laden an elektrischer Arbeit aufnimmt, gibt er beim Entladen (abgesehen von dem meistens vernachlässigbaren Verlust) als elektrische Arbeit wieder ab.

Somit hat man beim Wechselstrom im Gegensatz zum Gleichstrom zwei Widerstandsarten zu unterscheiden, nämlich

den **Wirkwiderstand,** in dem die mit dem Produkt der Effektivwerte I und U des Wechselstromes und der Wechselspannung gegebene elektrische **Wechselstrom-Leistung** $P = I \cdot U$ (Einheit **Watt**) in Leistung anderer Art umgesetzt wird, und

den **Blindwiderstand,** in dem kein Leistungsumsatz stattfindet. Auch da bildet man oft das Produkt $U \cdot I$.

Das Produkt $U \cdot I$ wird hier **Blindlast** oder (schlechter) auch **Blindleitung** genannt. Die Einheit hierfür ist nicht das Watt sondern das **Voltampere, reactive (Var).**

Für den Wirkwiderstand gilt Phasengleichheit von Spannung und Strom. Der Wechselstrom-Wirkwiderstand entspricht dem Gleichstromwiderstand. Folglich hat man hierzu das für Gleich- und Wechselstrom übereinstimmende Widerstands-Formelzeichen R und das dafür ebenfalls übereinstimmende Leitwert-Formelzeichen G.

Für den Blindwiderstand sind Sinus-Wechselspannung und Sinus-Wechselstrom gegeneinander um ein Viertel einer Periode phasenverschoben. Für ihn gibt es keinen vergleichbaren Gleichstromwiderstand. Die Formelzeichen sind für die Beträge des Blindwiderstandes X und des Blindleitwertes B.

Imaginär — unwirklich

Imaginär heißt »nur in der Vorstellung vorhanden«. Blindwiderstände sind vom Standpunkt des in Wirkwiderständen sich ergebenden Leistungsumsatzes eigentlich keine echten Widerstände. Das drückt man häufig aus, indem man sie Blindwiderstände und die ihnen zugeordneten Leitwerte Blindleitwerte nennt.
Diese Vorsilbe »**Blind**« ist vorwiegend in der Leistungs-Elektrotechnik üblich. In der Elektronik hat sich statt dessen mehr und mehr das Eigenschaftswort imaginär eingeführt. Ein Kondensator hat demgemäß einen imaginären Widerstand und demgemäß auch einen imaginären Leitwert.

Imaginäre Einheit

Das j, mit dem wir in diesem Kapitel Bekanntschaft geschlossen haben, nennt man nicht selten »imaginäre Einheit« und setzt

$$j = \sqrt{-1}$$

$\sqrt{-1}$ ist tatsächlich nur in der Vorstellung vorhanden. Das wäre nämlich die Zahl, die — mit sich selbst vervielfacht — die Zahl —1 ergibt.
Nun ist aber das Ergebnis jeder mit sich selbst multiplizierten Zahl positiv. Anders geht es gar nicht.
Wenn $\sqrt{-1}$ auch nur in der Vorstellung existiert, kann man doch damit rechnen. Hierzu zwei Beispiele:

$$j \cdot j = \sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} =$$

$\frac{1}{\sqrt{-1}}$ erweitert man mit $\sqrt{-1}$ und erhält so $\frac{\sqrt{-1}}{\sqrt{-1}\ \sqrt{-1}} = -\sqrt{-1}$.
Das entspricht $\frac{1}{j} = -j$.

$\sqrt{-1}$ liest man als »**Wurzel aus Minus Eins**« oder noch genauer als »**Quadratwurzel** aus Minus Eins«.

Wichtigstes über Kondensatoren bei Sinus-Wechselstrom

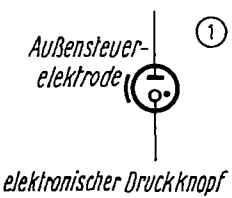
- Über einen Kondensator bzw. durch einen Kondensator hindurch kann Wechselstrom übertragen werden.
- Die am Kondensator auftretende Spannung hat bei zeitlichem Sinusverlauf des Wechselstromes ebenfalls Sinusverlauf (natürlich mit derselben Frequenz).
- Der Kondensatorstrom eilt der Kondensatorspannung um ein Viertel einer Periode voraus.
- Der Betrag des Kondensator-Leitwertes für einen Sinus-Wechselstrom ist das 6,28fache des Produktes aus der Frequenz des Wechselstromes und der Kapazität des Kondensators.
- Der Betrag des Kondensator-Widerstandes ist für Sinus-Wechselstrom der Kehrwert des dafür geltenden Kondensator-Leitwert-Betrages.

Elektronischer Druckknopf zum Ein- und Ausschalten

Elektronischer Druckknopf — eine Außensteuer-Glimmröhre

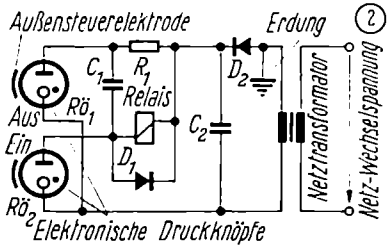
Der elektronische Druckknopf ist eine spezielle Glimm-Relaisröhre. Sie hat statt des Starters eine Außensteuer-Elektrode (ein Metallplättchen auf der Stirnseite des Röhrenkolbens).
Das **Bild 1** zeigt das Schaltzeichen. Diese Röhre kann zwischen Katode und Anode mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden. Zum Einleiten des Glimmstromes zwischen Katode und Anode dient ein elektrisches Wechselfeld. Ein solches kann aufgrund der Netzwechselspannung bei Berühren der Außensteuer-Elektrode der Röhre in deren Innerem zustande kommen.
Das Einleiten des Glimmstromes bezeichnet man wie bei allen anderen Glimmröhren als **Zünden.** Mit dem Zünden wird die Glimmröhre aus dem Sperrzustand in den Durchlaßzustand gekippt.
Zum Kippen der Röhre aus dem Durchlaßzustand in den Sperrzustand (**Löschen** genannt) muß man die Anoden-Katoden-Spannung unter einen bestimmten Wert (den **Löschwert**) der Glimmspannung absenken.
Der Löschwert liegt nur wenig unter dem **Brennwert** der Glimmspannung. Das ist der sich unter normalen Verhältnissen im Durchlaßzustand einstellende Wert der Anoden-Katoden-Spannung.

Das Schaltzeichen einer Außensteuer-Glimmröhre stimmt im wesentlichen mit dem einer Glimm-Diode überein. Das besondere Kennzeichen der Steuerbarkeit von außen ist der Kreisbogen, der die an der Außenseite des Röhrenkolbens angeordnete Steuerelektrode bedeutet.



Ein-Aus-Schaltung

Das **Bild 2** veranschaulicht eine Schaltung mit zwei elektronischen Druckknöpfen. Davon dienen der eine zum Einschalten und der andere zum Ausschalten eines Relais. Der jeweils erreichte Schaltzustand wird mit dem Glimmen der stromführenden Röhre unmittelbar angezeigt. Die beiden elektronischen Druckknöpfe sind hier mit Gleichspannung betrieben. Diese stammt aus dem Einweggleichrichter. Er besteht aus der Ventildiode D_2 und dem Ladekondensator C_2.



Schaltung für Berührungs-Ein-Aus-Schalter. Der Schaltzustand ist am Glimmen der jeweils stromführenden Röhre zu erkennen. Bemessung:
2 Außensteuerröhren Cerberus GK 11, $R_1 = 6{,}8\ k\Omega$, $C_1 = 1\ \mu F/250\ V$, $C_2 = 2\ \mu F$ (elektrolyt) /250 V, D_1 und D_2 Silizium-Dioden für wenigstens 20 mA/700 V. Transformator-Ausgangsspannung 140 V.

Die Wechselspannung, die beim Berühren der Außensteuer-Elektrode das den Glimmstrom-Durchgang einleitende elektrische Feld zu bewirken hat, wird mit dem Erden des einen Pols der Netztransformator-Ausgangswicklung ermöglicht. Aufgrund dieser Erdung haben die mit dem anderen Pol der Netztransformator-Ausgangswicklung verbundenen Katoden der beiden Röhren gegen Erde die volle Transformator-Ausgangsspannung.
Erden bedeutet in der Elektronik wie in der übrigen Elektrotechnik das Herstellen einer elektrisch gut leitenden Verbindung mit dem Grundwasserbereich der Erde. Manchmal setzt man in der Elektronik das Erden gleich dem Herstellen einer **Masseverbindung**. Das ist aber eine leitende Verbindung lediglich mit einem elektrisch leitenden **Chassis** (Gerätegestell) bzw. mit einer elektrisch leitenden Abschirm-Box.

Funktion der Schaltung

Im Anschluß an das Anlegen der Netzwechselspannung sind beide elektronischen Druckknöpfe ($Rö_1$ und $Rö_2$) zunächst gesperrt. Mit dem Berühren der Außensteuerelektrode der Röhre $Rö_2$ wird deren Glimmstrom eingeleitet. Dieser durchfließt die Relaiswicklung. Folglich wird der Relaisanker angezogen. Das Glimmlicht der Röhre $Rö_2$ zeigt diesen Betriebszustand an.
Berührt man dann die Außensteuerelektrode der Röhre $Rö_1$, so leitet man damit deren Glimmstrom ein. Dieser geht durch den Widerstand R_1, wozu an R_1 eine Spannung gehört. Deshalb springt die Anoden-Katoden-Spannung der Röhre $Rö_1$ vom Wert der Speisespannung auf den Brennwert der Anoden-Katoden-Spannung zurück. Dieser Spannungssprung wird über den Kondensator C_1 auf die Röhre $Rö_2$ übertragen. Daher geht die Anoden-Katoden-Spannung der Röhre $Rö_2$ vorübergehend unter deren Brennwert herunter. Die Folgen hiervon sind das Unterbrechen ihres Glimmstromes und deshalb auch das Abfallen des Relais-Ankers.

Der Ausschaltzustand des Relais wird nun mit dem Glimmen von $Rö_1$ angezeigt.
Um den Relaisstrom wieder einzuschalten, berührt man die Außensteuerelektrode der Röhre $Rö_2$. Aufgrund dessen fließt ihr Glimmstrom. Er bewirkt, daß der Relaisanker angezogen wird. Der mit dem Glimmstrom-Einsatz verbundene abrupte Rückgang der Anoden-Katoden-Spannung der Röhre $Rö_2$ auf den Brennwert, überträgt sich — wieder über den Kondensator C_1 — jetzt auf die Röhre $Rö_3$, womit die Röhre $Rö_2$ in den Sperrzustand zurückgekippt wird.

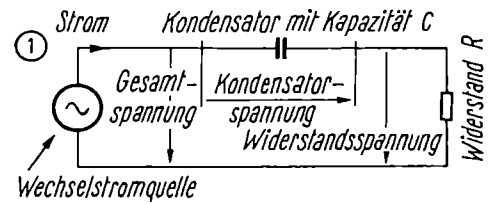
Wichtigstes über Außensteuer-Glimmröhren

- Der elektronische Druckknopf ist eine Glimm-Relaisröhre, die statt eines im Röhrenkolben angeordneten Starters eine Außensteuer-Elektrode hat.
- Zum Zünden der Außensteuerröhre, d. h. zum Kippen ihrer Katoden-Anoden-Strecke aus dem Sperrzustand in den Durchlaßzustand braucht man nichts zu drücken. Es genügt hierfür das Berühren der Außensteuer-Elektrode.
- Die Voraussetzungen für das hiermit bewirkte Zünden der Röhre sind: eine Speisespannung genügender Höhe zwischen Anode und Katode und eine ausreichende Wechselspannung zwischen Katode und Erde.
- Die elektronischen Druckknöpfe werden über kleine Netztransformatoren am Wechselstromnetz und zwar entweder mit Gleichspannung (wie in unserem Beispiel) oder mit Wechselspannung betrieben.
- Die Katode legt man an den einen Pol der Ausgangswicklung des Netztransformators. Den anderen Pol dieser Wicklung erdet man. So gewinnt man die zum Zünden erforderliche Wechselspannung gegen Erde.
- Bei Wechselspannungsbetrieb wird die Röhre solange während jeder für sie positiven Wechselspannungs-Halbwelle immer wieder von neuem gezündet, als man die Außensteuer-Elektrode berührt.

RC-Glied an Wechselspannung

Schaltung und Spannung

Als RC-Glied ist hier die Reihenschaltung eines Widerstandes mit einem Kondensator bezeichnet. **Bild 1** zeigt den Schaltplan. Dort ist links die das RC-Glied speisende Quelle eingetragen. Ihre Beschaffenheit interessiert uns hier nicht. Es kann sich dabei etwa um einen Anschluß an das Wechselstromnetz oder um eine **Generatorschaltung** (eine Schaltung mit einer Schwingstufe) handeln. Wichtig ist nur, daß die Quelle eine Sinus-Wechselspannung zur Verfügung stellt, die von dem damit bewirkten Strom nicht beeinflußt wird. Das bedeutet: Den Ausgangswiderstand der Quelle dürfen wir vernachlässigen.



Stromkreis, in dem die Reihenschaltung eines Kondensators mit einem ohmschen Widerstand an einer Sinus-Wechselspannung liegt.

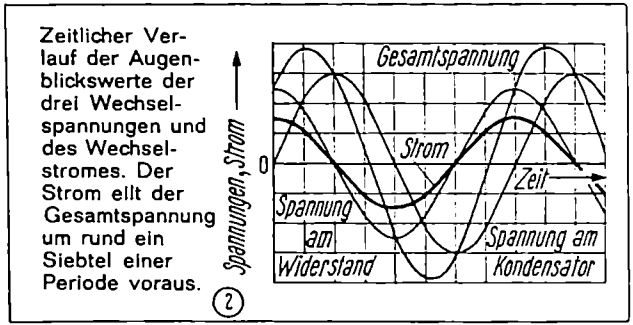
Der die Quelle enthaltende Stromkreis ist über einen Kondensator und einen damit in Reihe liegenden ohmschen Widerstand geschlossen. Die Werte der Kapazität und des Widerstandes sind mit den Formelzeichen *C* und *R* ausgedrückt.
Die Gesamtspannung gliedert sich in die Spannung am Kondensator und die Spannung am Widerstand.

Gesamtspannung und Teilspannungen

Aufgrund der Sinus-Wechselspannung der Quelle (der Gesamtspannung) fließt hier ein Sinus-Wechselstrom. Er passiert den Widerstand *R* und wird über den Kondensator *C* übertragen. Dabei tritt am Widerstand und am Kondensator je eine Wechselspannung auf.
Die Summe der Augenblickswerte dieser beiden Spannungen ist in jedem Zeitpunkt gleich dem hierfür geltenden Augenblickswert der Gesamtspannung. Bei zeitlichem Sinusverlauf der Gesamtspannung gilt ein solcher Verlauf auch für die beiden Teilspannungen.

Spannung am Widerstand

Die Spannung am Widerstand ist mit dem Strom in Phase (mit ihm phasengleich): Spannungs- und Strom-Augenblickswerte gehen gemeinsam durch Null. Außerdem erreichen Spannung und Strom gleichzeitig ihre Scheitelwerte desselben Vorzeichens. **Bild 2** zeigt das.



Zeitlicher Verlauf der Augenblickswerte der drei Wechselspannungen und des Wechselstromes. Der Strom eilt der Gesamtspannung um rund ein Siebtel einer Periode voraus.

Spannung am Kondensator

Die Spannung am Kondensator eilt dem Strom um ein Viertel einer Periode nach. Das heißt: Die Spannung geht von negativen zu positiven Augenblickswerten erst dann durch Null, wenn der Strom seinen positiven Scheitelwert gerade erreicht hat (Bild 2).
Anders ausgedrückt: Der Strom **eilt** der zu ihm am Kondensator gehörenden Spannung um ein Viertel einer Periode (um 90°) **voraus**.

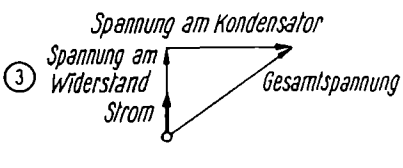
Zeigerdarstellung des Stromes mit den drei Spannungen

Bild 3 enthält das zu Bild 2 gehörende Zeigerbild. Darin bedeutet das Nacheilen um ein Viertel einer Periode ein Verdrehen des Zeigers um 90° im Uhrzeigersinn.

Man sieht: Der Zeiger der Spannung am Widerstand hat dieselbe Richtung wie der Stromzeiger. Der Zeiger der Spannung am Kondensator ist gegen den Stromzeiger um 90° im Uhrzeigersinn verdreht.
Ebenso richtig wäre das Zeigerdiagramm, wenn man — vom »Drehpunkt« des Stromzeigers ausgehend — zunächst den Zeiger der Kondensatorspannung hingezeichnet und an dessen Spitze den Zeiger der Spannung am Widerstand (rechtwinklig) angefügt hätte.
Unabhängig von dieser Reihenfolge ergibt sich derselbe Gesamtspannungszeiger, der von dem »Drehpunkt« des Zeigerdiagramms ausgeht, wobei seine Spitze mit der Spitze des letzten Teilspannungszeigers zusammenfällt.

Ortskurve der Spitze des Gesamtspannungszeigers

Unter einer Ortskurve versteht man ganz allgemein einen Linienzug, auf dem allein alle die Punkte liegen können, die bestimmten Bedingungen genügen. Dabei kann es sich statt um eine kurvenförmig verlaufende



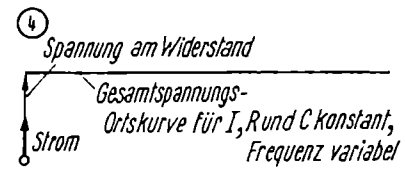
Das, was Bild 2 darstellt, als Zeigerdiagramm abgebildet. Ein Siebtel einer Periode bedeutet rund 51 °.

Linie auch gelegentlich einmal um eine gerade Linie handeln. Die gerade Linie läßt sich ja als Spezialfall einer Kurve auffassen.
Hier soll die Ortskurve, wie mit der Abschnitts-Überschrift angedeutet, die Linie sein, auf der die Spitze des Gesamtspannungszeigers bei gleichgehaltenem Wert des Stromes liegen muß. Jeder Punkt dieser Linie ist ein möglicher Endpunkt der Spitze des Gesamtspannungszeigers.
Wenn man die Frequenz bei gleichgehaltenem Scheitel- bzw. Effektivwert des Stromes ändert, beeinflußt man damit die Spannung an der Kapazität, während die Spannung am ohmschen Widerstand hierbei ihren Wert beibehält. Das bedeutet im Zeigerdiagramm ein Wandern der Zeigerspitze des Gesamtspannungszeigers auf der Geraden, die mit dem Gesamtspannungszeiger einen rechten Winkel bildet und die sich — von der Spitze des Zeigers der Spannung am Widerstand ausgehend — nach rechts erstreckt (**Bild 4**). Mit steigender Frequenz schiebt sich hier die Spitze des Gesamtspannungszeigers immer näher an die Spitze des Zeigers für die Spannung am Widerstand.

Grenzfrequenz

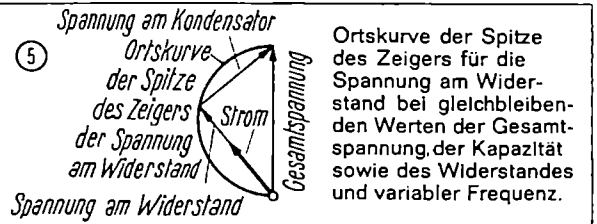
Diese Frequenz, bei der die Beträge der Spannungen an *R* und *C* einander gleich werden, spielt in vielen Fällen eine besondere Rolle. Hierbei betragen die beiden Teilspannungen jeweils das ($|\overline{2} \approx 0{,}707$)-fache der Gesamtspannung. Dazu gehört, daß die im Widerstand umgesetzte Leistung gerade halb so groß ausfällt wie die Leistung, die bei Anschluß des Widerstandes an die Gesamtspannung in ihm umgesetzt würde.

Hier ist die Ortskurve zu einer Geraden „entartet". Die Ortskurve betrifft die Spitze des Gesamtspannungszeigers.



Ortskurve der Spitze des Zeigers der Spannung am Widerstand

Im vorhergehenden Abschnitt handelte es sich um die variable Frequenz bei gleichgehaltenem Scheitelwert des Stromes.
Nun soll wieder die Frequenz variabel sein. Diesmal aber sei der Scheitelwert der Gesamtspannung konstant. Die beiden Teilspannungen sind gegeneinander um ein Viertel einer Periode phasenverschoben: Die Spannung am Kondensator eilt der Spannung am Widerstand um dieses Viertel einer Periode nach. Im Zeigerdiagramm bedeutet das Nacheilen um ein Viertel einer Periode das Verdrehen um 90° im Uhrzeigersinn.



⑤ Ortskurve der Spitze des Zeigers für die Spannung am Widerstand bei gleichbleibenden Werten der Gesamtspannung, der Kapazität sowie des Widerstandes und variabler Frequenz.

Wir betrachten in **Bild 5** zunächst nur die darin enthaltenen vier Zeiger, nämlich

- den Gesamtspannungszeiger (senkrecht),
- den Zeiger der Spannung am Widerstand,
- den Zeiger des mit dieser Spannung phasengleichen Stromes und
- den Zeiger der dem Strom um 90° nacheilenden Spannung am Kondensator.

Die drei Spannungszeiger bilden wieder ein rechtwinkliges Dreieck — genau so wie im Falle des Bildes 3.

Ganz allgemein gilt: Die Verbindungslinien irgend eines Punktes eines Halbkreises mit den Enden des Halbkreises schließen mit einander stets genau einen rechten Winkel ein. Das trifft auch für unser Spannungsdreieck zu: Hier haben wir es stets mit dem rechten Winkel zu tun, den die zwei Zeiger miteinander einschließen. Dabei bilden diese Zeiger in jedem Fall mit dem Gesamtspannungszeiger ein rechtwinkliges Dreieck. Der Gesamtspannungszeiger entspricht der Halbkreis-Grundlinie. Wegen des rechten Winkels muß die Spitze des Zeigers der Spannung am Widerstand also stets auf dem Halbkreis liegen, der den Gesamtspannungszeiger als ihn abschließenden Durchmesser hat. Der Halbkreis ist somit die hier geltende Ortskurve.

Er wird bei von Null ansteigender Frequenz vom »Drehpunkt« aus bis zu seinem anderen Ende durchlaufen.

Wer mit diesem Abschnitt Schwierigkeiten hatte, lasse sich nicht entmutigen. Man kommt in den meisten Fällen auch ohne die mit ihm zu vermittelnden Kenntnisse aus!

Wichtigstes über RC-Reihenschaltung an Wechselspannung

- Die Gesamt-Wechselspannung und die beiden Teil-Wechselspannungen der Reihenschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand bilden im Zeigerdiagramm ein rechtwinkliges Dreieck.
- Der Gesamtspannungszeiger stellt die Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks dar.
- Mit steigender Frequenz nimmt die Kondensatorspannung ab. Bei hoher Frequenz stimmt die Gesamtspannung nahezu mit der Spannung am Widerstand überein.
- Als wichtiger Sonderfall kommt die Gleichheit der Beträge der Spannungen an Kondensator und Widerstand in Betracht.
- Hierzu gehört eine bestimmte aus der Kapazität und dem Widerstandswert folgende Frequenz.

Feldeffekt-Transistor in Verstärkerschaltung

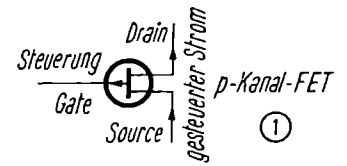
Übersicht über die Feldeffekt-Transistoren

Wenn man von den Transistoren spricht, meint man damit normalerweise die heute am meisten verwendeten npn-Transistoren und auch die pnp-Transistoren. Jeder solcher Transistor hat einen Emitter, einen Collector und eine Basis. Zum Steuern dient die Basis. Gesteuert wird der die Collector-Emitter-Strecke durchfließende Strom. Man steuert entweder mit dem Basisstrom oder mit der Basis-Emitter-Spannung. Natürlich tritt beim Steuern mit dem Basisstrom auch eine Basis-Emitter-Spannung auf. Ebenso gehört zur steuernden Basis-Emitter-Spannung ein gemeinsam mit ihr zustandekommender steuernder Basisstrom.

Außer den npn- und pnp-Transistoren gibt es die Feldeffekt-Transistoren, die sich wiederum in zwei große Gruppen gliedern, nämlich in

die eigentlichen Feldeffekt-Transistoren, die man auch **Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren** oder kurz **FETs** nennt, und in

die **Oberflächen-Feldeffekt-Transistoren,** die als **Metalloxyd-Feldeffekt-Transistoren** oder kurz als **MOSFETs** bezeichnet werden.



Schaltzeichen eines p-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors. Die zwischen Steuerung und Bahn des gesteuerten Stromes befindliche Sperrschicht muß in Sperrichtung vorgespannt seln. Hier also Gate negativ gegen Source.

Alle Feldeffekt-Transistoren haben sehr hohe Eingangswiderstände. Das bedeutet, daß die zum Steuern benötigten Signalleistungen äußerst klein sind. Ein weiterer Vorteil der Feldeffekt-Transistoren ist ihr geringes Rauschen.

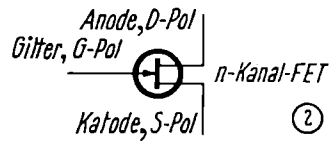
Feldeffekt-Transistoren erweisen sich aufgrund dieser beiden Eigenschaften insbesondere für Vorstufen als vorteilhaft. In Endstufen verwendet man sie zumindest derzeit noch nicht.

Hier sollen nur die FETs in Betracht gezogen werden. Das hierfür geltende Schaltzeichen zeigt **Bild 1.** Darin sind auch die Anschluß- bzw. Elektroden-Bezeichnungen eingetragen (siehe Tabelle auf Seite 72).

In Bild 1 ist der Strich, der die Steuerelektrode andeutet, mit einer Pfeilspitze versehen. Deren Richtung soll die Dotierung der Strombahn andeuten. Die in Bild 1 gezeigte Richtung kennzeichnet, daß die Strombahn p-dotiert ist. Die umgekehrte Richtung gehört zur n-Dotierung der Strombahn.

Deutsche Bezeichnung	Amerikanische Bezeichnung	Aussprache	Bedeutung (Elektrode)	entspricht bei pnp/npn-Transistor:
Katode Quelle S-Pol	**Source**	Suhrß	ein Anschluß der gesteuerten Strombahn	Emitter
Anode Senke D-Pol	**Drain**	Dräin	der andere Anschluß der gest. Strombahn	Collector
Gitter Tor G-Pol	**Gate**	Gäit	Steuerelektrode	Basis

Die Strombahn nennt man hier auch **Kanal.** Demgemäß zeigt das Bild 1 das Schaltzeichen eines **p-Kanal-FET. Bild 2** enthält das Schaltzeichen eines **n-Kanal-FET.** Außerdem sind in Bild 2 die weiteren Varianten der Anschlußbezeichnungen eingetragen. Statt p-Kanal und n-Kanal sagt man hier auch FET vom **n-Typ** und **p-Typ.** Beim Entwerfen von Schaltplänen ist die eingetragene Pfeilspitze als Hinweis für die Polung nützlich:
Sie zeigt die Durchlaßrichtung der Sperrschicht an, die man **gesperrt** zu verwenden hat.



Schaltzeichen eines n-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekt-Transistors. Hier sind für die drei Elektroden des FET andere der gebräuchlichen Bezeichnungen eingetragen als in Bild 1.

Eine zusätzliche Information über Transistoren

Diesen Abschnitt kann man ohne weiteres überschlagen. Er ist nur für die Leser bestimmt, die etwas über das »Innenleben« der Transistoren erfahren möchten:
Die Systeme der npn-Transistoren und pnp-Transistoren umfassen, wie mit npn und pnp angedeutet, drei Zonen. Diese unterscheiden sich in ihren **Dotierungen,** d. h. in den sie enthaltenden winzigen Mengen an Fremdatomen. Sie sind so ausgewählt, daß sie den Zonen zweierlei elektrische Eigenschaften verleihen (es stehen n für negativ und p für positiv). Dort, wo eine n-Zone und eine p-Zone aneinander angrenzen, ergibt sich eine **Sperrschicht.** Das ist eine Schicht, die den Strom für die eine Richtung sperrt und ihn in der anderen Richtung bei Überschreiten einer Spannung von mehreren zehnteln Volt (d. h. der Schleusenspannung oder Schwellenspannung) durchläßt.
In npn- und pnp-Transistoren handelt es sich somit um

zwei hintereinander liegende, entgegengesetzt gepolte Sperrschichten, nämlich die **Emitter-Basis-Sperrschicht** und die **Basis-Collector-Sperrschicht.** Diese Transistoren betreibt man so, daß die Collector-Emitter-Speisespannung mit ihrer Polung der Durchlaßrichtung der Emitter-Basis-Sperrschicht und der Sperrichtung der Basis-Collector-Sperrschicht entspricht. Die Basis-Emitter-Spannung muß für Stromdurchgang durch den Transistor so gepolt sein, daß dies ebenfalls der Durchlaßrichtung der Emitter-Basis-Sperrschicht gleichkommt.

Ein Stromdurchgang durch die Basis-Collector-Sperrschicht wird damit erreicht, daß man einen Basisstrom bewirkt. Dieser ermöglicht dem Strom, der sich über Collector und Emitter des Transistors schließen soll, den Durchgang durch den Transistor und so das Passieren beider Sperrschichten.

Jede Sperrschicht hat zwei besondere Eigenschaften, die man in den FETs ausnutzt:

- Eine Sperrschicht, an der keine Spannung oder eine der Sperrichtung gemäß gepolte Spannung liegt, ist praktisch frei von beweglichen Ladungsträgern, d. h. von Elektronen oder von Elektronen-Fehlstellen, deren gleichsinnige Bewegung das darstellt, was wir elektrischen Strom nennen.
- Die Sperrschicht-Dicke nimmt bei Erhöhen der in Sperrichtung an sie angelegten Spannung zu.

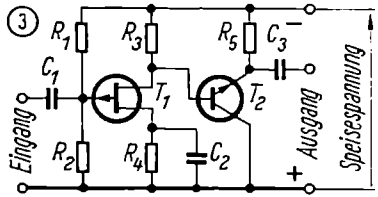
Ein FET enthält nur eine Sperrschicht. Diese wird stets so an eine Spannung gelegt, daß das ihrer Sperrichtung entspricht. Die Sperrschicht ist in einem FET so angeordnet, daß man mit der an sie angelegten Sperrspannung den für den Stromdurchgang zwischen Source und Drain (zwischen S-Pol und D-Pol) verfügbaren Querschnitt im Transistor-Kristall verändern kann. Die Sperrschicht begrenzt also hier den Stromweg und wird selbst nicht von dem Strom durchflossen, der mit ihrer Hilfe gesteuert wird.

Bei den FETs unterscheidet man, wie schon erwähnt, solche mit n-Kanal von solchen mit p-Kanal. n und p kennzeichnen hierbei die Dotierung des stromdurchflossenen Kristallbereiches. Der Bereich, der die Steuerelektrode darstellt, hat jeweils die entgegengesetzte Dotierung.

Man bezeichnet die npn- und pnp-Transistoren, weil in ihnen **zwei** entgegengesetzt dotierte Zonen vom gesteuerten Strom durchflossen werden, als **Bipolar-Transistoren** (Bi bedeutet Zwei) und die FETs demgemäß als **Unipolar-Transistoren** (nur eine Zone von Strom durchflossen).

Eine Verstärkerschaltung

Bild 3 zeigt den Schaltplan eines zweistufigen Verstärkers, dessen erste Stufe mit einem p-Kanal-FET bestückt ist. Die zweite Stufe stellt einen Emitterfolger dar, der einen npn-Transistor enthält. Diese Kombina-



Zweistufiger Verstärker mit einem FET im Eingang und einem npn-Emitterfolger im Ausgang. Sehr hoher Eingangs-Widerstand R_{in}, mäßiger Ausgangswiderstand R_{out}.

tion eines FET mit einem Emitterfolger ist besonders günstig: Der FET hat außer dem sehr erwünschten hohen Eingangswiderstand (genauer: außer der sehr hohen Eingangsimpedanz) einen recht hohen Ausgangswiderstand (eine hohe Ausgangsimpedanz). Letzteres wäre störend. Deshalb setzt man hinter die FET-Stufe gerne einen Emitterfolger. Er hat einen niedrigen Ausgangswiderstand.

Die positive Gitter-Katoden-Vorspannung, die sich hier gemäß der im FET-Schaltzeichen eingetragenen Pfeilspitze als notwendig erweist, wird mit dem Bemessen der Widerstände erreicht: R_1 hat einen weit höheren Wert als R_2 während die Werte von R_3 und R_4 gleich sind. Hier eine Dimensionierung nach SGS-Fairchild-Unterlagen:

$R_1 = 15\ M\Omega$, $R_2 = 3{,}3\ M\Omega$, $R_3 = 100\ k\Omega$, $R_4 = 100\ k\Omega$, $R_5 = 4{,}7\ k\Omega$, $T_1 = 2\ N\ 3278$, $T_2 = 2\ N\ 2484$, $R_{in} \approx 3\ M\Omega$, $U_{out} : U_{in} = 10$, Speisespannung $= 12\ V$.

Wichtigstes über Sperrschicht-FETs

- Der (Sperrschicht-)Feldeffekt-Transistor (FET) ist ein Halbleiter-Bauelement mit einem steuerbaren Strombahn-Querschnitt.
- Die Strombahn mit dem steuerbaren Querschnitt wird von dem zu steuernden Strom durchflossen.
- Diese Strombahn (Kanal genannt) ist von einer Sperrschicht umschlossen.
- Die Sperrschicht ergibt sich, wie jede Sperrschicht in einem Halbleiter-Bauelement, aufgrund entgegengesetzter Dotierungen des Halbleiterkörpers.
- Die Grenzfläche zwischen der Strombahn und der Sperrschicht steht unter dem Einfluß der Steuerspannung des Feldeffekt-Transistors.
- Die Steuerelektrode (Gate, Gitter oder G-Pol genannt) wird mit der der Sperrichtung der Sperrschicht entsprechenden Polung vorgespannt.
- Mit dem Verlagern der Grenzfläche werden der Strombahn-Querschnitt und so der Strombahndurchgang gesteuert.
- Feldeffekt-Transistoren haben sehr hohe Eingangs-Impedanzen. Sie eignen sich schon aus diesem Grund gut zum Bestücken von Eingangsstufen.
- Die Ausgangs-Impedanzen der mit FETs bestückten Verstärkerstufen sind gleichfalls hoch.
- Daher ergänzt man vielfach eine Vorstufe, die einen Feldeffekt-Transistor enthält, mit einem Emitterfolger.

Selen-Ventile im Graetz-Gleichrichter

Selen-Ventil

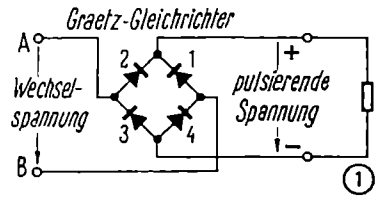
Selen (gesprochen Selehn) ist ein chemisches Element. Ein Selen-Ventil hat wie die anderen elektrischen Ventile (vor allem die Silizium-Ventile, die Silizium-Dioden und die Germanium-Dioden) für die eine Stromrichtung (die Durchlaßrichtung) einen hohen Durchlaß-Leitwert und für die entgegengesetzte Stromrichtung (die Sperrrichtung) einen hohen Sperrwiderstand. Das heißt vom Standpunkt der Praxis aus:
Das Selen-Ventil läßt den Strom in der einen Richtung durch und sperrt ihn in der Gegenrichtung. Diese Ventil-Eigenschaft ist bei den Selen-Ventilen etwas weniger stark ausgeprägt als bei den Silizium-Ventilen. Da ihre Systeme aber größere Abmessungen haben und deshalb mehr Masse aufweisen als die Silizium-Ventile, sind die Selen-Ventile kurzzeitig stärker überlastbar. Außerdem liegt ihr Preis für manche Anwendungsgebiete besonders günstig.

Reihenschaltung von Selen-Ventilen

Ein einzelnes Selen-Ventil ist eine mehrschichtige Platte. Solche Platten werden vielfach als »**Säulen**« oder in Gehäusen (als »**Kleingleichrichter**«) zusammengebaut. Vor allem kommen gleichsinnige Reihenschaltungen da in Betracht, wo die Sperrspannung höher sein muß als die höchstzulässige Sperrspannung der einzelnen Platte. In Schaltplänen stellt man eine solche gleichsinnige Reihenschaltung meistens mit einem einzelnen Ventilschaltzeichen dar.

Graetz-Gleichrichter

Die Graetz-Schaltung besteht aus vier Einzelventilen oder (an ihrer Stelle) aus vier gleichsinnigen Ventil-Reihenschaltungen (**Bild 1**).



Der aus vier Halbleiter-Ventilen bestehende Graetz-Gleichrichter ist eine Weichenschaltung, die beide Wechselspannungs-Halbwellen gleichsinnig zur Geltung bringt.

Der Graetz-Gleichrichter läßt die an ihn angelegte Wechselspannung auf der Gleichspannungsseite mit durchweg gleicher Polung zur Geltung kommen:
Hat auf der Wechselstromseite der Punkt A gegen den Punkt B gerade eine positive Spannung (positive Halbwelle der Wechselspannung A gegen B), so geht der hiermit bewirkte Strom vom Punkt A durch das Ventil 2 zum Lastwiderstand und von dort durch das Ventil 4 zum Punkt B.
Weist der Punkt A gegen den Punkt B eine negative Spannung auf (negative Halbwelle der Wechselspannung A gegen B), so fließt der Strom über die Ventile 1 und 3.

Pulsierende Spannung

Am Ausgang des Graetz-Gleichrichters ist somit eine zwischen Null und dem um die geringe Ventil-Durchlaßspannung verminderten Wechselspannungs-Scheitelwert pulsierende Spannung verfügbar. Diese Spannung steigt während jeder halben Wechselspannungs-Periode von Null aus an, erreicht den Scheitelwert mit jeweils gleichem Vorzeichen nahezu und fällt dann wieder auf Null ab.
Eine jede pulsierende Spannung ist die Summe aus einer Gleichspannung und einer Wechselspannung. Die Gleichspannung stellt den zeitlichen Mittelwert der pulsierenden Spannung dar.

Manche Leute sprechen von **pulsierenden Gleichspannungen.** Das ist ebenso sinnvoll wie von einer gebirgigen Ebene zu reden.

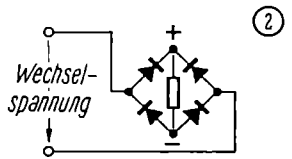
Pulsierender Strom = eine Folge von Stromimpulsen derselben Richtung

Schließt man gemäß Bild 1 an den Ausgang des Graetz-Gleichrichters als Belastung einen ohmschen Widerstand an, so ergibt sich aufgrund der pulsierenden Spannung ein pulsierender Strom. Jeder Stromimpuls setzt dabei erst ein, wenn die Spannung den doppelten Wert der Schleusenspannung eines Ventils übersteigt, da der Strom ja hintereinander zwei Ventile durchfließen muß.

Die Bezeichnung Brückengleichrichter

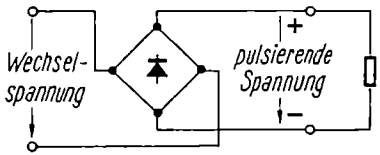
Die vier Ventile bilden eine Brückenschaltung für die die Belastung den Brückenzweig darstellt. Das wird deutlich, wenn man Bild 1 so umzeichnet, wie **Bild 2** dies zeigt.
Daher stammt die Bezeichnung »Brückengleichrichter«.
Dieser Gleichrichter hat die für manche Anwendung störende Eigenheit, daß man nur entweder einen Pol der Wechselspannung oder einen Pol der pulsierenden Spannung an Masse bzw. an Erde anschließen darf.

Variante des Schaltplans von Bild 1: Der Lastwiderstand ist hier als Brücke in den Graetz-Gleichrichter eingetragen.



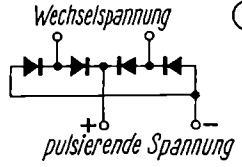
②

Der Schaltplan nach Bild 1 mit einem vereinfachten Schaltzeichen, wie es für den Graetz-Gleichrichter oft verwendet ist.



③

Dieses Schaltzeichen, das man gelegentlich für den Graetz-Gleichrichter vorfindet, entspricht seinem Aufbau aus Selenzellen.



④

In Schaltplänen wird die Graetz-Schaltung häufig vereinfacht so dargestellt, wie **Bild 3** das zeigt. **Bild 4** veranschaulicht den Aufbau eines Graetz-Gleichrichters als »Säule«.

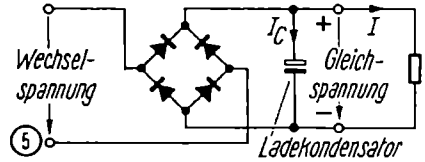
Statt Selen-Ventile auch andere Ventil-Dioden

Graetz-Schaltungen (Graetz-Gleichrichter) kann man ebenso wie aus Selen-Ventilen auch aus Silizium-Ventilen, Silizium-Dioden oder Germanium-Dioden aufbauen. Das nutzt man in ständig steigendem Maß aus. Hierfür gelten die Darstellungen nach Bild 1, 2 und 3 ebenso wie für Selen-Ventile.

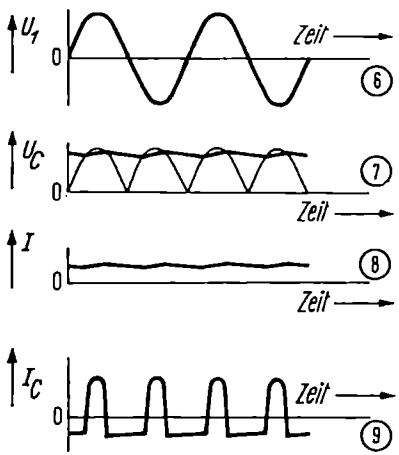
Zufügen eines Ladekondensators

In der Schaltung nach Bild 1 ergeben sich für die dort rechts als Widerstand eingetragene Belastung eine pulsierende Spannung und deshalb auch ein pulsierender Strom. Wird statt der pulsierenden Spannung eine Gleichspannung benötigt, so muß man parallel zur Belastung einen Kondensator schalten (**Bild 5**). Dieser wird über den Graetz-Gleichrichter während jeder Periode der Wechselspannung zweimal nachgeladen und wirkt so in den Zwischenzeiten für die Last als Stromquelle.

Bild 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Netzwechselspannung U_1. In **Bild 7** ist dünn der zeitliche Verlauf der



Schaltung nach Bild 1 mit Lade- (Elektrolyt-) Kondensator ergänzt.



Zeitlicher Verlauf der Spannungen und Ströme in der Schaltung nach Bild 1.

pulsierenden Spannung eingetragen, wie sie sich ohne den Ladekondensator ergäbe. Die dicke Linie veranschaulicht dort den zeitlichen Verlauf der Spannung U_C am Ladekondensator und damit auch an der Last. **Bild 8** betrifft den hierzu gehörenden Laststrom I. **Bild 9** veranschaulicht, daß es sich beim Kondensator um einen Wechselstrom handelt (positiver Strom = **Ladestrom**, negativer Strom = **Entladestrom**).

Ventil und Gleichrichter

Ein elektrisches Ventil ist ein Bauelement, das Strom nur in einer Richtung durchläßt. Unter einem Gleichrichter hat man hingegen eine Schaltung zu verstehen, an deren Ausgang eine Gleichspannung bzw. eine pulsierende Spannung zur Verfügung steht, wenn ihr Eingang an eine Wechselspannung angeschlossen ist.

Wichtigstes über Selen-Ventile

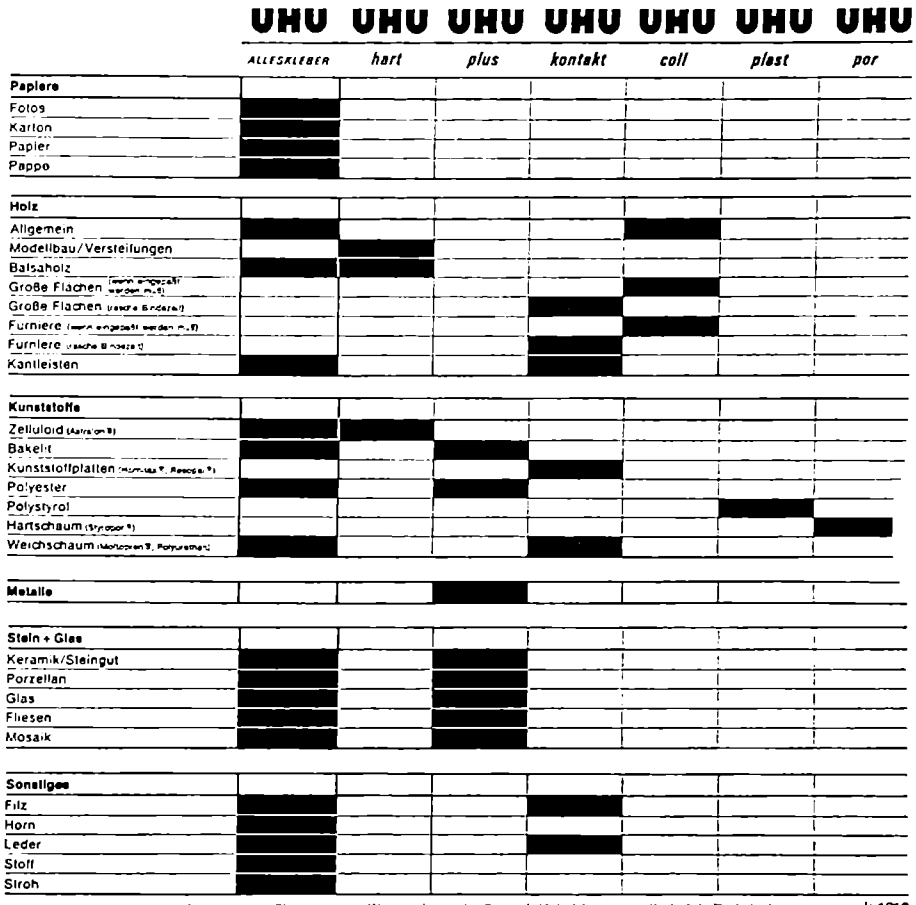
- Selen-Ventile nennt man auch Selen-Gleichrichterzellen.
- Zusammengeschaltete Selen-Gleichrichterzellen werden als Selen-Gleichrichter oder als Selen-Gleichrichtersätze bezeichnet.
- Selen-Ventile sind gegen Überstromstöße weitgehend unempfindlich.
- Die Durchlaßspannung beträgt bei Nennstrom etwa 1 V bis 2 V.

Sachverzeichnis

Änderungsgeschwindigkeit 14
Allgemeine Logikzahl 20
Amplitude 31
Anode 7, 18, 72
Anschlußbezeichnungen
  Dioden 18 · FETs 71, 72
  Glimm-Relaisröhren 7
  Transistoren 25
Anstiegszeit 30
Ausgangs-Logikzahl 20
Außensteuer-Glimmröhren 64
Basis 25
Basis-Collector-Sperrsch. 73
Basis-Emitter-Sperrschicht 73
Bauartkonstante (VDR) 14
Belag (Kondensator) 57
Betragsstriche 60
Binär-Verknüpfung 19, 52
Bipolar-Transistor 73
Blindlast 62
Blindleistung 62
Blindwiderstand 62
Blinkschaltung 25
Brennspannung 7, 46, 67
Brennwert 7, 67
Brückengleichrichter 76
Chassis 65
Collector 25
Collector-Basis-Stromverh. 28
Diode 18
Dotierung 25, 72
D-Pol 72
Drain 72
Druckknopf, elektronischer 64
Durchlaßrichtung 18
Durchlaßspannung 18
Durchlaßzustand 28
Durchschaltzustand 28
Effektivwert 34
Ein-Aus-Schalter 64
Eingangs-Logikzahl 20
Emitter 25
Emitter-Basis-Sperrschicht 73
Emitter-Pfeilspitze 25
Entladung (Kondensat.) 58, 78
Erden 65
Erholzeit, Erholungszeit 10
Feldeffekt-Transistoren 71
Flußrichtung = Durchlaßricht. 18
Frequenz 31
Funken 17
Gasgef. Gleichrichterröhre 18
Gate 72
Gegenphasigkeit 33
Generatorschaltung 67
Germaniumdiode 19
Germanium-Photodiode 42
Germanium-Phototransistor 43
Gigahertz 31
Gitter (FET) 72
Gleichphasigkeit 33
Gleichrichter 75
Gleichrichterröhren 18
Glimm-Außensteuerröhre 64
Glimm-Relaisröhren 7
Glimmröhre mit Hilfsanode 47
— ohne Hilfsanode 46
G-Pol 72
Graetz-Gleichrichter 75
Grenzfrequenz 69
Grundfrequenz, -welle 32
Halbschwingung, -welle 30
Harmonische 32
Hauptanode 47
Hauptstrecke 7
Henry 14
Hertz 31
Hilfsanode 47
H-NAND-Pegeltafel 56
H-NOR-Pegeltafel 56
Hochvakuum-Gleichrichterröhre 15
H-ODER-Pegeltafel 21
H-ODER-Schaltung 23
H-UND-Pegeltafel 21
H-UND-Schaltung 22
Hysteresespannung 42
H-Zuordnung 21
Imaginäre Einheit 63
Induktivität 14
Intervallspannung 42
Inversion 52
Inverter 52
i-Zone 25
Jot 61
Kaltkatoden-Relaisröhre 8
Kaltkatoden-Schaltröhre 8
Kanal (FET) 72
Kapazitiver Leitwert 60, 61
Kapazitiver Widerstand 60, 61
Katode 7, 18, 72
Kilohertz 31
Kleingleichrichter 75
Kombinierte Verknüpfungsschaltung 23
Komplementäre Transistoren 25
Kondensator an Wechselspannung 57
Kondensator im Gleichrichter 77
Kondensator in RC-Glied 67
Kreisfrequenz 60
Ladekondensator 77
Ladung (Kondensator) 58, 78
Leitwert kapazitiv 60
Lichtfühler 11, 37
Lichtrelais 43
L-NAND-Pegeltafel 56
L-NOR-Pegeltafel 56
L-ODER-Pegeltafel 21
Löschen (Glimmstrom) 64
Löschspannung 48, 64
Löschwert 64
Logikglied 19
Logikschaltung 22
Logigtafel 20
Logikzahl 19
L-UND-Pegeltafel 21
L-Zuordnung 21
Magnetfeld-Arbeitsinhalt 14
Masseverbindung 65
Materialkonstante (VDR) 14
Megahertz 31
Mehrwelliger Wechselstrom 32
Metalloxyd-Feldeffekt-Transistor (MOSFET) 71
Nachellen 33
NAND-Logiktafel 54, 55
NAND-Pegeltafel 55, 56
NAND-Verknüpfung 54, 55
Nanoampere 43
Negation 53
Negative Logik 21

NICHT-Verknüpfung
= Inversion 53
n-Kanal-FET 72
NOR-Logiktafel 54, 55
NOR-Pegeltafel 55, 56
NOR-Verknüpfung 54, 55
n-Typ-FET 72
n-Zone 25
Oberfl.-Feldeffekt-Trans. 71
Oberwellen 32
ODER-Logiktafel 20
ODER-Pegeltafel 21
ODER-Schaltung 23
ODER-Verknüpfung 20
Öffnungsfunken 17
Ortskurven 68, 69
Pegeltafeln 21, 55, 56
Periodischer Wechselstrom 29
Pfeilspitze in Emitterstrich 25
Phasenverschiebung 33, 38, 60
Photodiode 11, 12
Photoelektron. Bauelement 11
Photoelement 11, 37, 39
Photoleiter 11
Phototransistor 11, 43
Photowiderst. = Photoleiter 11
p-Kanal-FET 72
Polung b. Wechselspannung 33
Positive Logik 21
Präzisions-Spannungs-
Stabilisatorröhre 51
p-Typ-FET 72
Pulsierende Spannung 76
Pulsierender Strom 76
p-Zone 25
Quadratwurzel (aus —1) 63
Quelle (FET) 72
RC-Glied 8
RC-Glied an Wechsel-
spannung 67
Rechteckverlauf (zeitlich) 30
Referenzspannungsröhre 51
Regelbereich (Glimmröhre) 47
Relaisröhre 7
Sägezahnverlauf (zeitlich) 30
Säule (Gleichrichter) 75
Schaltintervall 41
Schaltröhre 8
Scheitelwert 30
Schleichende Änderung 38
Schleusenspannung 22, 28
Schwellenspannung 22, 28
Schwingung 32
Selen-Gleichrichter 75
Selenventil 75
Selenzelle 37
Senke (FET) 72
Signalspannungspegel 19, 21
Siliziumdiode 19
Silizium-Phototransistor 43
Siliziumtransistor 52
Sinusverlauf (zeitlich) 30
Solarzelle 37
Source (FET) 72
Spannungsabhängiger Wider-
stand 14
Spannungspegel 21
Spannungs-Stabilisatorröhre 50
Sperrleitwert 11
Sperrichtung (Diode) 18
Sperrschicht 72
Sperrschicht-FET 71
Sperrspannung 18
Sperrstrom 18
Spieldauer 26
Spitze-zu-Spitze-Wert 31
S-Pol (FET) 72
Stabilisatorröhre 45, 51
Starter-Zündspannung 7
Stoßionisation 46
Strom-Änderungs-
geschwindigkeit 14
Stromquelle 58
Stromrichtung bei Wechsel-
strom 34
Symbole für Logik-
Verknüpfungen 21
Symbolische Rechnung
(Wechselstrom) 36
Tor (FET) 72
Teilwelle 32
Transistoren 72
Überspannung 14
Überspannungsschutz 16
Umladung (Kondensator) 58
UND-Logiktafel 20
UND-Pegeltafel 21
UND-Schaltung 23
UND-Verknüpfung 20
Unipolar-Transistor 73
Unwahr 21
Var 62
Varistor 14
VDR 14
Vektor 36
Ventildiode 17
Vergleichsspannungsröhre 51
Verknüpfung 19
Verknüpfungselement 19
Verknüpfungsglied 19
Verknüpfungssymbole 21
Verknüpfungstafeln 20, 21,
54, 55
Voreilen 68
Voltampere, reaktive 62
Wahr 21
Wahrheitstafel 20
Wechselgröße 32
Wechselspannung 33
Wechselspannungsquelle 29
Wechselstrom 29
Wechselstrom-Leistung 62
Wechselstrom-Quelle 56
Wechselstromrichtung 34
Welle (Wechselspannung,
Wechselstrom) 32
Wiederbereitschaftszeit 10
Widerstandsgerade 49
Wirkwiderstand 62
Zeiger 35, 36
Zeigerdarstellungen 35, 59, 68
Zeitkonstante (RC-Schaltung) 9
Zeitschalter (Zeitrelais) 8
Zeitverhalten 28
Zone (in Halbleiter-Bau-
element) 73
Zonenfolge 25
Zünden (Glimmstrecken) 7,
46, 64
Zündspannung 7, 46
Zündübernahme 7, 47
Zündwert 7, 45
Zuordnung (*H* und *L*) 21
Zweipol 17

Was klebe ich womit am besten?



Astralon® – Eingetragenes Warenzeichen der Dynamit Nobel Aktiengesellschaft in Troisdorf
Hornilex® – Eingetragenes Warenzeichen der Gebr. Künnemeyer in Horn/Lippe
Moltopren® – Eingetragenes Warenzeichen der Farbenfabriken Bayer Aktiengesellschaft in Leverkusen
Resopal® – Eingetragenes Warenzeichen der H. Römmler GmbH. in Groß Umstadt
Styropor® – Eingetragenes Warenzeichen der BASF AG in Ludwigshafen

k 1216

Im Falle eines Falles klebt UHU wirklich alles

Diesen UHU-Fahrplan gibt es auch im Taschenformat.
Fordern Sie ihn bitte beim UHU-Werk an. UHU-Werk H.u.M.Fischer · 758 Bühl (Baden)

Inhalt des 1. Bandes:

Gleichstromquelle — ihr Sinn und Zweck
Gleichstromquellen in Schaltungen
Widerstand, Widerstandswert und Leitwert
Einstellwiderstände und einstellbare Spannungsteiler
Heiß- und Kaltleiter
Photoleiter
Kondensator an Batterie
Widerstand und Kondensator als RC-Glied
Induktivität beim Schließen eines Gleichstromkreises
Induktivität und Freilaufdiode
Ventil-Diode im Einweggleichrichter
Transistoren zum Schalten von Relais
Z-Dioden für das Stabilisieren von Gleichspannungen
Transistoren in Verstärkerstufe
Transistoren in Gleichspannungskonstanthaltern
Glimmröhren in Kippschaltung

Inhalt des 3. Bandes:

Transistor als Emitterfolger
Komplexer Wechselstrom-Widerstand und Leitwert
Transistor und Ventildiode als Umschalter
npn-Transistoren in Schmitt-Trigger
Glimmthyratron in Dämmerungsschalter
Transformator in Wechselstrom-Netzteil
Fremdgeheizte Heißleiter als Stellwiderstände
Thyristor zum Steuern und Schalten
Referenzverstärker in Gleichspannungs-Stabilisator
Tunnel-Diode in Impuls-Restaurierungsstufe
Triac als Wechselstromschalter
Feldplatte in einer Schaltung als Magnetfeldfühler
Mehrfach-Transistor für Flüssigkeitsstands-Kontrolle
Ventildiode in Transistor-Schutzschaltung
Hallgenerator
Diac und Triac zum Wechselstrom-Einstellen